

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

EDUARDO MORAES QUIRINO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE CORPOS DE PROVA
DE PLA GERADOS POR MANUFATURA ADITIVA E
RECOMENDAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO EM
DISPOSITIVOS ASSISTIVOS**

SÃO CARLOS
2020

EDUARDO MORAES QUIRINO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE CORPOS DE PROVA
DE PLA GERADOS POR MANUFATURA ADITIVA E
RECOMENDAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO EM
DISPOSITIVOS ASSISTIVOS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecatrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de concentração: projeto, manufatura e materiais.

Orientadora: Prof. Dra. Zilda de Castro Silveira.

SÃO CARLOS

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Moraes Quirino, Eduardo
ME24a Avaliação experimental de corpos de prova de PLA
gerados por manufatura aditiva e recomendações sobre a
aplicação em dispositivos assistivos. / Eduardo Moraes
Quirino; orientador Zilda de Castro Silveira. São
Carlos, 2020.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica)
-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, 2020.

1. Manufatura Aditiva. 2. Tecnologia Assistiva. 3.
Planejamento de Experimentos. 4. Técnica FFF (Fused
Filament Fabrication). 5. PLA (Ácido Polilático). 6.
Análise de Sensibilidade Paramétrica. 7. Pessoas com
Deficiência . I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato: Eduardo M. Quirino

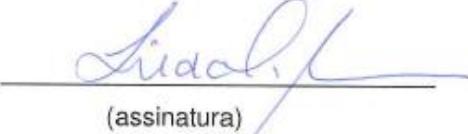
Título: Avaliação experimental de corpos de prova de PLA gerado por manufatura aditiva e recomendações em dispositivos assistivos.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA

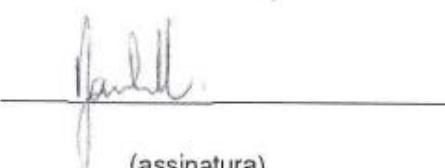
Professora Zilda de Castro Silveira - SEM-EESC-USP
(Orientadora)

Nota atribuída: 9,5 (Nove e meio)


(assinatura)

Professor Jonas de Carvalho - SEM-EESC-USP

Nota atribuída: 9,5 (Nove e meio)


(assinatura)

Pesquisador MSC. Eng. Paulo Inforçatti Neto, CTI-Campinas

Nota atribuída: 9,5 (Nove e meio)


(assinatura)

Média: 9,5 (Nove e meio)

Resultado: Aprovado

Data: 11/12/2020.

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM NÃO Visto do orientador



“Para as pessoas sem deficiência a tecnologia torna as coisas mais fáceis.
Para as pessoas com deficiência, a tecnologia torna as coisas possíveis.”

(RADABAUGH, 1993)

Quirino, E. M. Avaliação experimental de corpos de prova de PLA gerados por manufatura aditiva e recomendações sobre a aplicação em dispositivos assistivos. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2020.

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi analisar o uso da técnica de manufatura aditiva FFF para fabricação de dispositivos assistivos de PLA com conceitos de desenvolvimento de produto centrado no usuário. A análise realizada permitiu maior compreensão do contexto social existente no desenvolvimento de produtos para tecnologia assistiva. Os recursos dessa área possibilitam às pessoas com deficiência maior qualidade de vida, independência e inclusão social. Porém, devido ao não atendimento das demandas específicas de cada usuário, elevadas são as taxas de abandono dos dispositivos assistivos, algo que causa prejuízos individuais e coletivos. Nesse contexto, nota-se que é fundamental que o processo de desenvolvimento do produto seja centrado no usuário, de modo que o uso da manufatura aditiva nessa área é muito vantajoso, pois possibilita a customização dos dispositivos, contribuindo diretamente para a aceitação e satisfação dos usuários. A partir disso, destaca-se a relevância das análises de sensibilidade paramétrica das variáveis de impressão, realizadas nessa monografia pela caracterização de corpos de prova com base nos procedimentos estatísticos do DOE. Observou-se que a porcentagem de preenchimento tem forte correlação positiva com a resistência mecânica e com o tempo de impressão. Corpos de prova impressos com a estratégia de preenchimento favo apresentaram, em geral, maior resistência mecânica em relação aos que utilizaram estratégia retilínea. Além disso, verificou-se que em peças com preenchimento favo o uso de espessura de camada maior potencializou as propriedades mecânicas. Ainda sobre essa estratégia: observou-se melhores propriedades para peças impressas na direção , devido à orientação não ortogonal dos hexágonos que compõem a estrutura interna da peça. Notou-se que existe diferença nas propriedades mecânicas de filamentos de PLA de cores distintas, devido alterações das características mecânicas do material pelo processo de pigmentação. Em complemento da análise estatística, observou-se através das análises micrografias que maiores índices de empacotamento estão relacionados à maior adesão entre camadas e, portanto, maior resistência mecânica.

PALAVRAS-CHAVE: FFF; PLA; Planejamento de experimentos; Tecnologia assistiva.

Quirino, E. M. **Experimental evaluation of PLA specimens generated by additive manufacturing and recommendations for application in assistive devices.** Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2020.

ABSTRACT

The goal of this work was to analyze the use of the FFF additive manufacturing technique to manufacture assistive devices with PLA based on user-centered product development concepts. The analysis performed allowed a better understanding of the existing social context in the development of assistive technology products because resources in this area enable people with disabilities to improve their quality of life, autonomy, and social inclusion. However, due to the failure to meet the specific demands of each user, the abandonment rates of assistive devices are high, something that causes individual and collective losses. In this context, it is noted that it is essential that the product development process is centered on the user, so that the use of additive manufacturing in this area is very advantageous, as it allows the customization of devices, which directly contributes to the satisfaction of users. Based on this, sensitivity analyzes are relevant for the optimization of 3d printing parameters, in this monograph these analyzes were carried out from the characterization of specimens based on DOE statistical procedures. It was observed that the percentage of filling has a strong positive correlation with mechanical strength and printing time. Test specimens printed with the honeycomb infill pattern showed, in general, greater mechanical resistance compared to those that used the rectilinear pattern. In addition, it was found that in parts with honeycomb pattern the use of a thicker layer enhanced the mechanical properties. Still, about this infill pattern: better properties were observed for specimens printed in the X direction, due to the non-orthogonal orientation of the hexagons in the internal structure of the parts. Greater mechanical resistance was observed when using PLA filament of blue color than virgin, due to changes in the mechanical characteristics of the material by the pigmentation process. In addition to the statistical analysis, it was observed through the micrographs analysis that higher packing indices are related to greater adhesion between layers and, therefore, greater mechanical resistance.

KEYWORDS: FFF; PLA; Design of Experiments; Assistive Technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Infográfico da porcentagem de pessoas com deficiência e distribuição percentual por faixas etárias da incidência no Brasil em 2010.....	27
Figura 2 – Normas ISO e ASTM gerais para manufatura aditiva.	34
Figura 3 – Gráfico do número de impressoras 3D <i>low-end</i> vendidas a cada ano.	35
Figura 4 – Representação esquemática do subsistema de deposição de uma impressora FFF.	36
Figura 5 – Etapas de processo de manufatura aditiva	36
Figura 6 – Modelo CAD renderizado, na esquerda, e STL, na direita.	37
Figura 7 – Representação do efeito degrau.	39
Figura 8 – Representação do efeito degrau em função da espessura de camada. ..	39
Figura 9 – Erros e desvios geométricos na direção z.....	39
Figura 10 – Efeito da anisotropia na aplicação de solicitação mecânica.....	40
Figura 11 – Esquemático dos conceitos de base e suporte	41
Figura 12 – Parâmetros de processo na técnica FFF.	41
Figura 13 – Orientação de construção	42
Figura 14 – Exemplos de estratégias e porcentagens de preenchimento	43
Figura 15 – Esquemático dos conceitos de parede, topo e piso.	44
Figura 16 – Exemplos do número de paredes.....	44
Figura 17 – Representação geométrica de um experimento fatorial 2^2	51
Figura 18 – Representação geométrica e matriz de planejamento fatorial 3^2	53
Figura 19 – Representação geometria planejamento fatorial 3^2 , efeitos principais (a), interações entre dois fatores (b) e interações entre três fatores (c).	53
Figura 20 – Exemplo de um gráfico de Pareto de efeitos padronizados.	55
Figura 21 – Experimento fatorial sem interação (a) e com interação (b).....	56

Figura 22 – Exemplo de gráfico de um modelo válido.....	57
Figura 23 – Pessoas com deficiência e barreiras sociais.....	58
Figura 24 – Nível de instrução da população de 15 anos ou mais, com e sem deficiência.	60
Figura 25 – Porcentagem de artigos publicados por categorias de tecnologia assistiva de 2012 a 2018	75
Figura 26 – Quantidade de estudos 2012 a 2018 por tipos de órteses, próteses e acessórios.	75
Figura 27 – Metodologia AT-d8sign (fases e tarefas).....	76
Figura 28 – Exemplo de órteses fabricadas pela empresa XKelet	78
Figura 29 – Exemplo de colher para auxílio na alimentação fabricada por manufatura aditiva.....	79
Figura 30 – Comparativo entre ABS (a) e PLA (b).	87
Figura 31 – 3D Cloner DH.....	89
Figura 32 – Ambiente do ClonerGen3D durante: posicionamento da peça na bandeja, seleção dos parâmetros e visualização do código g.	90
Figura 33 – Ambiente do ClonerMake3D de painel de controle para interação com a máquina, e ambiente durante o processo de impressão.....	91
Figura 34 – Orientação de construção.	92
Figura 35 – Equipamento (a) de ensaio de tração (b) e flexão (b).	96
Figura 36 – Corpos de prova de tração (a) e flexão (b).....	97
Figura 37 – Exemplo de gráfico obtido no ensaio de tração	97
Figura 38 – Exemplo de gráfico obtido no ensaio de flexão	98
Figura 39 – Microscópio Eletrônico de Varredura LEO440	99
Figura 40 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (tensão máxima de tração; $\alpha = 0,05$)	100
Figura 41 – Gráficos de efeitos principais na tensão máxima de tração	101

Figura 42 – Gráfico de interações na tensão máxima de tração	101
Figura 43 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (tensão máxima de tração; $\alpha = 0,05$)	102
Figura 44 – Gráficos de efeitos principais na tensão máxima de tração	102
Figura 45 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (módulo de elasticidade de tração; $\alpha = 0,05$).....	103
Figura 46 – Gráficos de efeitos principais no módulo de elasticidade de tração	104
Figura 47 – Gráfico de interações para módulo de elasticidade de tração.....	104
Figura 48 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados no módulo de elasticidade de tração ($\alpha = 0,05$)	105
Figura 49 – Gráficos de efeitos principais no módulo de elasticidade de tração	105
Figura 50 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (tensão máxima de flexão; $\alpha = 0,05$)	106
Figura 51 – Gráficos de efeitos principais na tensão máxima de flexão.....	107
Figura 52 – Gráfico de interações para tensão máxima de flexão	107
Figura 53 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados na tensão máxima de flexão ($\alpha = 0,05$)	108
Figura 54 – Gráficos de efeitos principais na tensão máxima de flexão.....	108
Figura 55 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (módulo de elasticidade de flexão; $\alpha = 0,05$)	109
Figura 56 – Gráficos de efeitos principais para o módulo de elasticidade de flexão	110
Figura 57– Gráfico de interações para módulo de elasticidade de flexão	110
Figura 58 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (módulo de elasticidade de flexão; $\alpha = 0,05$)	111
Figura 59 – Gráficos de efeitos principais no módulo de elasticidade de flexão	111
Figura 60 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (erro em z; $\alpha = 0,05$).....	112

Figura 61 – Gráficos de efeitos principais para erro em z	113
Figura 62 – Gráficos de interações para erro em z	113
Figura 63 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (erros em XY; $\alpha = 0,05$) sem redução do modelo.....	114
Figura 64 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (erros em XY; $\alpha = 0,05$) com redução do modelo.....	115
Figura 65 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (tempo de impressão; $\alpha = 0,05$)	115
Figura 66 – Gráficos de efeitos principais no tempo de impressão	116
Figura 67 – Micrografia do corpo de prova 9 de tração.....	122
Figura 68 – Micrografia do corpo de prova 35 de tração.....	123
Figura 69 – Micrografia do corpo de prova 39 e 41 de tração	123
Figura 70 – Infográfico resumo da análise paramétrica.	126
Figura 71 – Gráficos de resíduos para tensão máxima de tração na primeira rodada experimental.....	149
Figura 72 – Gráficos de resíduos de módulo de elasticidade de tração na primeira rodada experimental.....	150
Figura 73 – Gráficos de resíduos de tensão máxima de flexão na primeira rodada experimental.....	152
Figura 74 – Gráfico de resíduos de módulo de elasticidade de flexão na primeira rodada experimental.....	153
Figura 75 – Gráfico de resíduos de erros em z na primeira rodada experimental...154	
Figura 76 – Gráfico de resíduos de erros no plano XY na primeira rodada experimental.....	154
Figura 77 – Gráfico de resíduos de tempo de impressão na primeira rodada experimental.....	155
Figura 78 – Gráfico de resíduos da tensão máxima de tração na primeira rodada experimental.....	158

Figura 79 – Gráfico de resíduos do módulo de elasticidade de tração na primeira rodada experimental.....	159
Figura 80 – Gráfico de resíduos da tensão máxima de flexão na primeira rodada experimental.....	160
Figura 81 – Gráfico de resíduos do módulo de elasticidade de flexão na primeira rodada experimental.....	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela Genérica da ANOVA	54
Tabela 2 – Categorias de tecnologia assistiva.....	66
Tabela 3 – Resumo da aplicação de manufatura aditiva na área da saúde.....	72
Tabela 4 – Comparativo de propriedades ABS e PLA.	86
Tabela 5 – Parâmetros variáveis na primeira rodada experimental.	93
Tabela 6 – Parâmetros fixos na primeira rodada experimental.	94
Tabela 7 – Parâmetros variáveis na segunda rodada experimental.....	94
Tabela 8 – Parâmetros fixos na segunda rodada experimental.	95
Tabela 9 – Parâmetros variáveis na primeira rodada experimental.	147
Tabela 10 – Matriz de planejamento da primeira rodada experimental.	147
Tabela 11 – Resultados da primeira rodada experimental.	148
Tabela 12 – ANOVA da tensão máxima de tração da primeira rodada experimental.	149
Tabela 13 – ANOVA primeira rodada módulo de elasticidade de tração.	150
Tabela 14 – ANOVA primeira rodada tensão máxima de flexão.	151
Tabela 15 – ANOVA primeira rodada módulo de elasticidade de flexão.	152
Tabela 16 – ANOVA primeira rodada erro em z.....	153
Tabela 17 – ANOVA primeira rodada erros em XY.....	154
Tabela 18 – ANOVA primeira rodada tempo de impressão.	155
Tabela 19 – Parâmetros variáveis na segunda rodada experimental.....	157
Tabela 20 – Parâmetros fixos na segunda rodada experimental.	157
Tabela 21 – Matriz de planejamento da segunda rodada.	157
Tabela 22 – Resultados experimentais da segunda rodada.	157

Tabela 23 – ANOVA segunda rodada tensão máxima de tração.....	158
Tabela 24 – ANOVA segunda rodada módulo de elasticidade de tração.....	159
Tabela 25 – ANOVA segunda rodada tensão maxima de flexão.	160
Tabela 26– ANOVA segunda rodada módulo de elasticidade de flexão.	161

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (Análise de Variância)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAT	Comitê de Ajudas Técnicas
CNRTA	Centro Nacional de Referência em Tecnologia Assistiva
DOE	<i>Design of Experiments</i> (Planejamento de Experimentos)
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IQSC	Instituto de Química de São Carlos
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITS	Instituto de Tecnologia Social
MA	Manufatura Aditiva
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
OMS	Organização Mundial da Saúde
PETG	Politereftalato de Etileno Glicol
PcD	Pessoa com Deficiência
PLA	Ácido Polilático
SECIS	Secretaria de Ciência e Tecnologia para a Inclusão Social

SEDH/PR	Secretaria Especial dos Direitos Humanos da Presidência da República
SUS	Sistema Único de Saúde
TA	Tecnologia Assistiva
TUP	Poliuretano Termoplástico
USP	Universidade de São Paulo
σ_T	Tensão máxima de tração
E_T	Módulo de elasticidade de tração
σ_F	Tensão máxima de flexão
E_F	Módulo de elasticidade de flexão
e_z	Erro médio dos corpos de prova de tração e flexão no eixo Z
e_{xy}	Erro médio dos corpos de prova de tração e flexão no plano XY
t_n	Tempo de impressão normalizado em 1

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	27
1.1. OBJETIVOS.....	30
1.2. MOTIVAÇÃO	30
1.3. ESTRUTURA DA MONOGRAFIA.....	31
2. EMBASAMENTO TEÓRICO	33
2.1. MANUFATURA ADITIVA: TÉCNICA FFF.....	33
2.1.1. Visão geral	33
2.1.2. Planejamento de processo.....	36
2.1.3. Características inerentes.....	38
2.1.3.1. Efeito degrau.....	38
2.1.3.2. Desvios e erros dimensionais no eixo z (vertical)	39
2.1.3.3. Anisotropia	40
2.1.3.4. Base e estrutura de suporte	40
2.1.4. Parâmetros de processo	41
2.1.4.1. Orientação de construção.....	42
2.1.4.2. Espessura da camada	43
2.1.4.3. Estratégia de preenchimento.....	43
2.1.4.1. Porcentagem de preenchimento.....	44
2.1.4.2. Número de contornos (parede, topo e piso)	44
2.1.4.3. Velocidade de impressão	45
2.1.4.4. Temperatura de extrusão	45
2.1.4.5. Material de impressão.....	45
2.2. MATERIAIS DE ENGENHARIA: POLÍMEROS.....	46
2.2.1. Visão geral	46
2.2.2. Termoplásticos.....	46
2.2.3. Ácido Polilático (PLA).....	47
2.2.4. Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	48
2.2.5. Politereftalato de Etileno (PETG)	48
2.2.6. Poliuretano Termoplástico (TPU)	48
2.3. DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)	49
2.3.1. Visão geral	49
2.3.2. Análise de variância (ANOVA)	54
2.3.3. Principais resultados	55
2.3.4. Verificações do modelo	56

2.4. PESSOAS COM DEFICIÊNCIA	58
2.5. TECNOLOGIA ASSISTIVA	61
2.5.1. Visão geral	61
2.5.2. Cenário brasileiro	63
2.5.3. Categorias	65
2.5.4. Desenho universal	68
3. ANÁLISE DO USO DE MANUFATURA ADITIVA NA ÁREA DA SAÚDE.....	71
3.1. DESAFIOS E BENEFÍCIOS	71
3.2. DISPOSITIVOS ASSISTIVOS.....	73
3.2.1. Visão geral	73
3.2.2. Órteses	77
3.2.3. Dispositivos para auxílio diário	79
3.2.4. Contexto social	80
3.2.5. Abandono	82
3.2.6. Customização	84
3.2.7. Materiais de impressão	85
4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE CORPOS DE PROVA.....	89
4.1. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	89
4.1.1. Equipamento, softwares e material de impressão	89
4.1.2. Definição dos fatores, níveis e respostas	92
4.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	96
4.2.1. Ensaios mecânicos de tração e flexão	96
4.2.2. Análise de erros dimensionais e tempo de impressão.....	98
4.2.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	98
4.2.4. Procedimentos estatísticos	99
4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA	100
4.3.1. Tensão máxima de tração.....	100
4.3.2. Módulo de elasticidade de tração	103
4.3.3. Tensão máxima de flexão	106
4.3.4. Módulo de elasticidade de flexão	109
4.3.5. Erros dimensionais no eixo z	112
4.3.6. Erros dimensionais no plano XY	114

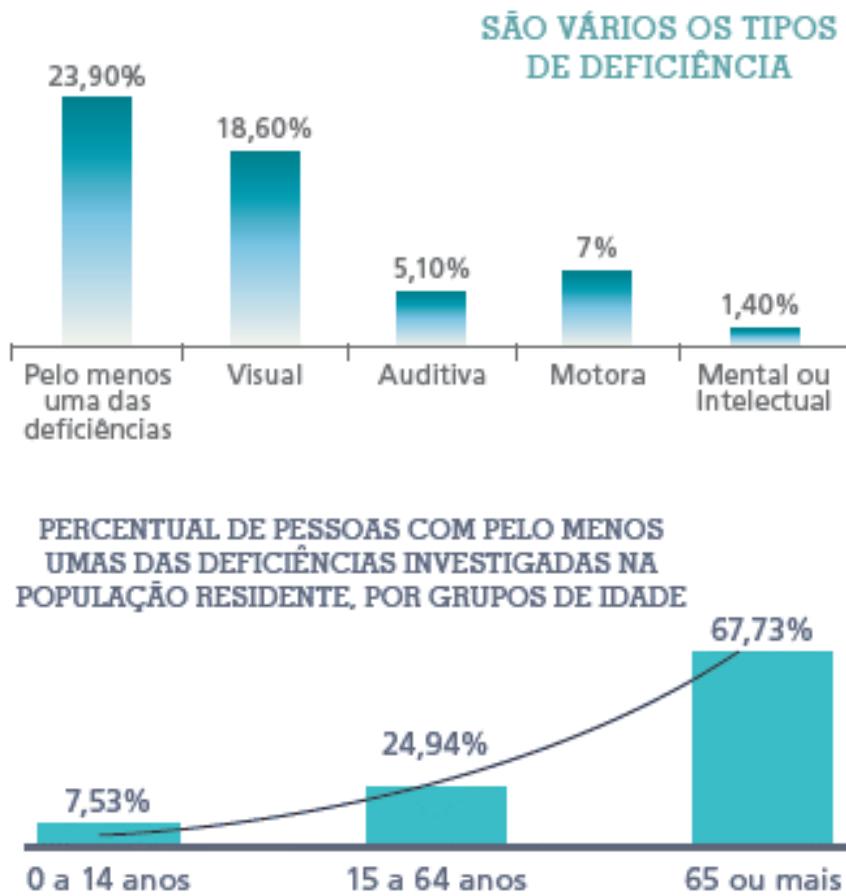
4.3.7.Tempo de impressão	115
4.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	117
4.4.1.Efeitos principais.....	117
4.4.1.1. Espessura de camada	117
4.4.1.2. Estratégia de preenchimento.....	118
4.4.1.3. Número de paredes	118
4.4.1.4. Cor do filamento.....	119
4.4.1.5. Direção de impressão.....	119
4.4.1.6. Porcentagem de preenchimento.....	119
4.4.2.Interações entre fatores	120
4.4.2.1. Espessura de camada * estratégia de preenchimento.....	120
4.4.2.2. Espessura de camada * cor do filamento.....	120
4.4.2.3. Espessura de camada * direção de impressão	121
4.4.2.4. Estratégia de preenchimento * cor do filamento.....	121
4.4.2.5. Estratégia de preenchimento * direção de impressão.....	122
4.4.3.Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	122
4.4.4.Análise paramétrica	124
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
REFERÊNCIAS	131
ANEXOS	147

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia assistiva compreende uma ampla gama de equipamentos, serviços, estratégias e práticas concebidas e aplicadas para minorar os problemas funcionais encontrados por pessoas com deficiências. (COOK; POLGAR, 2013).

De acordo com dados do IBGE, no ano 2000, 14,5% da população brasileira apresentava alguma deficiência. Já em 2010, esse número subiu para 23,9%, ou seja, no total existiam em torno de 45 milhões de pessoas com deficiência no Brasil. Conforme exposto no infográfico da Figura 1, as deficiências motoras acometiam cerca de 7% da população, aproximadamente 4 milhões de pessoas. Além disso, é importante observar o acréscimo significativo da incidência de deficiências de acordo com o aumento da faixa etária da população analisada (IBGE, 2010).

Figura 1 – Infográfico da porcentagem de pessoas com deficiência e distribuição percentual por faixas etárias da incidência no Brasil em 2010.



Fonte: IBGE (2010).

A Secretaria de Ciência e Tecnologia para a Inclusão Social (SECIS), em parceria com o Instituto de Tecnologia Social (ITS), aponta que os estados do Rio Grande do Sul, São Paulo e Rio de Janeiro, concentravam 77% dos projetos de tecnologia assistiva desenvolvidos entre 2005 e 2008 no Brasil (RODRIGUES; ALVES, 2013). Em contrapartida, o Censo de 2010, mostrava que o Nordeste era a região com o segundo maior número de pessoas com deficiência (IBGE, 2010).

Apesar de constar na legislação brasileira o direito da pessoa com deficiência de ter acesso aos recursos de tecnologia assistiva de que necessitar, é notório que o Brasil se encontra no início de um trabalho para o reconhecimento e estruturação dessa área, apresentando ainda enorme déficit em tecnologia assistiva para a população necessitada. E mesmo diante dessa grande demanda reprimida, o estágio de incentivos à pesquisa e à produção nacional de recursos de tecnologia assistiva é embrionário (BERSCH, 2017).

Em termos mundiais, estima-se que cerca de 600 milhões de pessoas não possuem dispositivos assistivos adequados (DE COUVREUR; GOOSSENS, 2011). Além disso, as necessidades específicas dos usuários de tecnologias assistivas e as características socioculturais de seu contexto são em muitos casos desprezadas, levando à construção de dispositivos que não atendem de maneira satisfatória o usuário devido à problemas de usabilidade e ergonomia. Nesse cenário, tem-se uma questão relevante de altas taxas de subutilização e abandono dos dispositivos (PHILLIPS; ZHAO, 1993; PLOS et al, 2012).

Dessa forma, existe claramente um segmento de oportunidades relacionadas ao desenvolvimento de produtos de tecnologia assistiva, com destaque para o crescimento de contribuições entre áreas de engenharia e áreas de saúde visando desenvolvimento e aprimoramento da utilização de manufatura aditiva na fabricação de dispositivos assistivos, com vantagens como: redução do tempo de projeto e fabricação, menor custo, menos falhas no processo, viabilização de melhor prognóstico para o usuário, customização conforme o usuário, dentre outras vantagens (CABRAL et al, 2019; CRUZ et al, 2016; PALOUSEK et al., 2014).

Sendo amplamente reconhecido que o conforto do paciente é um fator importante para evitar abandono do dispositivo, sabe-se que a manufatura aditiva pode ter contribuição eficaz na área de tecnologia assistiva. Por exemplo, órteses fabricadas por impressão 3D com conceito de desenvolvimento de produto centrado no usuário, são personalizadas e adequados à anatomia do paciente, facilitando a higiene, enquanto que órteses convencionais de talas gessadas são pesadas e geralmente causam coceira e mau cheiro (CABRAL; et al, 2019).

A manufatura aditiva apresenta características técnicas desejáveis para um sistema de manufatura flexível, de modo que os avanços dessa tecnologia representam uma nova era na manufatura, com perspectivas reais e concretas de constante desenvolvimento para melhorias nos processos e ampliação da gama de aplicações possíveis (KUPPER; HEISING; CORMAN, 2017). Na área de tecnologia assistiva, opta-se geralmente pela técnica de processo aditivo por extrusão FFF (*Fused Filament Fabrication*) devido à possibilidade de fabricação de dispositivos resistentes com custo relativamente baixo (FERRARI et al., 2019). Segundo Statista (2018), essa técnica é a predominante nas máquinas do tipo *low-end*, de baixo custo, e também é conhecida como FDM (*Fused Deposition Modeling*).

Para impressão de uma peça é necessário definir um razoável número de parâmetros que podem influenciar nas propriedades visuais e mecânicas (VOLPATO, 2017). Portanto, para que se possa otimizar o processo é importante ter ciência de quais os parâmetros mais influentes e de que forma eles influenciam nas propriedades, haja visto que dispositivos assistivos são submetidos à esforços mecânicos, de modo que é relevante um estudo sistemático com geração de corpos de prova para avaliar comportamentos relacionados a micro e mesoestrutura.

Nesse contexto, destacam-se as técnicas do DOE (*Design of Experiments*) para planejamento e análise de experimentos, as quais possibilitam o estudo da influência de parâmetros de processo através de métodos de variação simultânea que possibilitam extrair informações do sistema com tempo e custo reduzidos. Além disso, conta-se com a ferramenta da análise de variância (ANOVA) para verificar se os efeitos dos parâmetros nas respostas são estatisticamente significativos (BRUNS et al., 2001; ANDERSON; WHITCOMB, 2016; MONTGOMERY, 2017).

1.1. OBJETIVOS

Esta monografia foi desenvolvida pelo discente Eduardo Moraes Quirino como Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecatrônica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP).

A motivação desse trabalho é a análise dos potenciais de utilização da técnica de manufatura aditiva FFF para fabricação de dispositivos assistivos de PLA, perante conceitos de desenvolvimento de produto com foco no usuário para diminuição das taxas de subutilização e de abandono. O escopo resumido da monografia envolve a análise do uso de impressão 3D na área de tecnologia assistiva, para entendimento dos desafios e requisitos envolvidos, e a análise de sensibilidade paramétrica através da caracterização de corpos de prova, para entendimento da influência dos parâmetros de impressão. Desse modo, pretende-se ampliar, aprofundar e consolidar a compreensão da aplicação de manufatura aditiva para fabricação de dispositivos assistivos.

1.2. MOTIVAÇÃO

Experimentos tornam-se cada vez mais importantes ao passo que se intensificam as exigências dos dispositivos assistivos. Nesse sentido, muitas vezes no processo de desenvolvimento de novos produtos, para embasar decisões, necessita-se obter informações empiricamente, e para isso deve-se realizar um bom planejamento experimental que possibilite coletar e analisar dados relevantes de uma forma estatisticamente correta (GALDAMEZ; CARPINETTI, 2004).

Durabilidade e resistência são aspectos extremamente importantes para dispositivos assistivos (BERSCH, 2017). E conforme exposto na seção 2.1.4, existem diversos parâmetros de processo que alteram as propriedades micro e mesoestruturais de itens fabricados por manufatura aditiva (SOOD, et al., 2012). Desse modo, observa-se que análises experimentais são importantes para obtenção de informações acerca da sensibilidade paramétrica de propriedades mecânicas e métricas de processo relevantes para aplicação da manufatura aditiva na fabricação de produtos de tecnologia assistiva.

Os experimentos, detalhados na seção 4 desse trabalho, tiveram como objetivo principal inferir sobre a mesoestrutura de corpos de prova impressos para estabelecer uma correlação entre os parâmetros de processo e características mecânicas: resistência à tração e modulo de tração; resistência à flexão e módulo de flexão, tempo de impressão e erros dimensionais. Além disso, foram realizadas análises preliminares de microscopia eletrônica de varredura para avaliar a estrutura morfológica de alguns corpos de prova. Devido às limitações impostas pela pandemia do coronavírus, tem-se como embasamento os experimentos e análises prévias realizadas pelo discente durante período de iniciação científica no ano de 2019 (QUIRINO, 2019). De modo que no presente trabalho é feita uma análise mais aprofundada dos dados e da literatura, visando correlação com os requisitos e expectativas da aplicação de manufatura aditiva na fabricação de dispositivos assistivos, conforme detalhamento feito na seção 3.2.

1.3. ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Esta monografia está dividida em 5 capítulos.

No primeiro capítulo tem-se a introdução, na qual é apresentado o escopo do trabalho, as motivações para escolha do tema e os principais objetivos pretendidos.

No segundo capítulo é construído o embasamento teórico do trabalho através de uma revisão bibliográfica sobre os temas pertinentes.

No terceiro capítulo desenvolve-se uma análise da aplicação de manufatura aditiva na área da saúde, explorando principalmente tópicos relacionados ao desenvolvimento de produtos de tecnologia assistiva.

No quarto capítulo é apresentada a caracterização de corpos de prova, sua metodologia e resultados, além disso desenvolve-se também uma análise criteriosa dos dados experimentais visando a aplicação em dispositivos assistivos.

No quinto capítulo apresentam-se as conclusões do trabalho e sugerem-se possíveis trabalhos futuros com base no que foi desenvolvido pelo discente.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1. MANUFATURA ADITIVA: TÉCNICA FFF

2.1.1. Visão geral

A manufatura aditiva (MA) é uma técnica de fabricação fundamentada na adição de material, geralmente por processo de deposição de camadas, de forma controlada e seletiva, possibilitando obter geometrias de alto grau de complexidade. O termo técnico utilizado, manufatura aditiva, foi estabelecido por meio da norma ASTM F2792 de 2009, a qual foi atualizada para ISO/ASTM 52900 em 2015 (ISO/ASTM, 2015; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Também conhecida popularmente como impressão 3D, essa tecnologia começou gradativamente a surgir no final da década de 60 e era inicialmente chamada de prototipagem rápida (TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

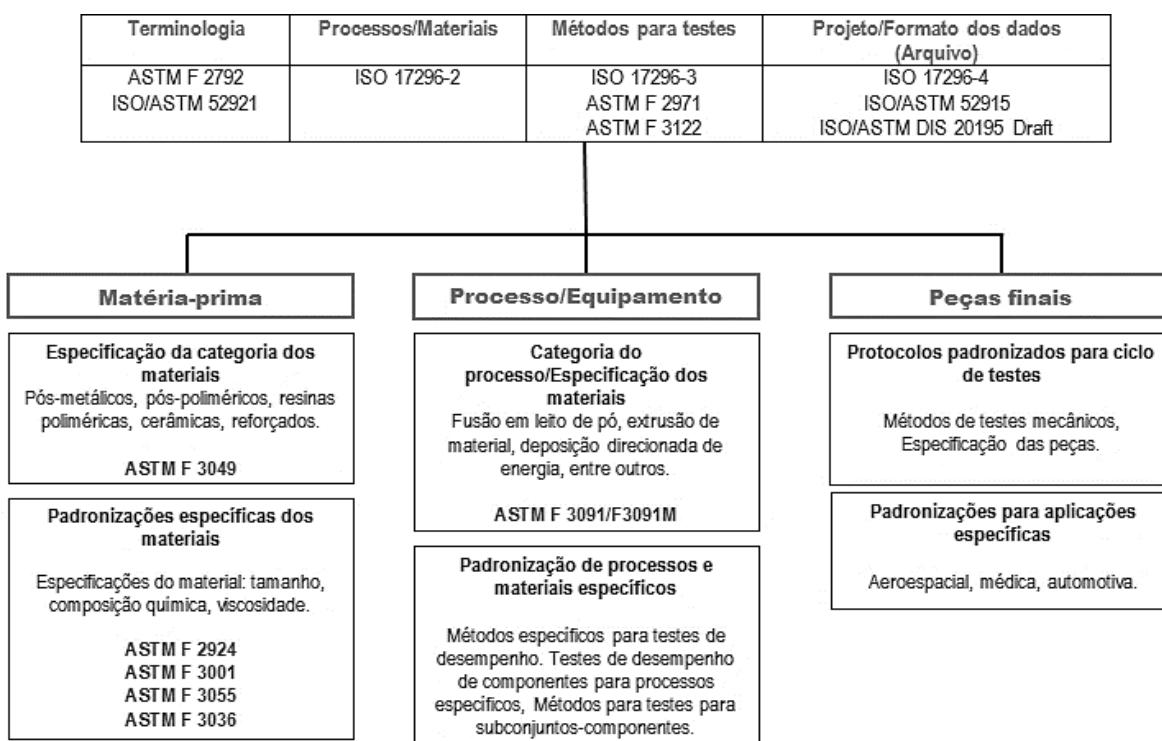
Até a década de 80 as aplicações de manufatura aditiva restringiam-se à fabricação de protótipos visuais na área de arquitetura e raros protótipos físicos em processos de desenvolvimento de produto (TURNER; STRONG; GOLD, 2014). Entretanto a partir da década de 90 houve grande evolução dessa tecnologia, possibilitando novas aplicações por meio do atendimento de requisitos técnicos de propriedades físicas e mecânicas dos itens manufaturados. Desse modo, houve ampliação do uso para além de protótipos visuais e físicos, permitindo a fabricação de protótipos técnicos e produtos finais (FORD; DESPEISSE, 2016). Essas novas possibilidades alavancaram a utilização de equipamentos de manufatura aditiva em sistemas produtivos, de modo que atualmente essa tecnologia é considerada um dos pilares do conceito de indústria 4.0 (WAHLSTER, 2014; WHOLERS, 2017).

Segundo Rodrigues et al. (2017), as sete principais áreas de aplicação da manufatura aditiva são: equipamentos de baixo custo; produção de bens de consumo; produtos voltados à área de saúde; prototipagem industrial; manutenção, reparo e operação; fabricação de ferramental; processos produtivos que envolvam customização e participação dos usuários em diferentes fases do desenvolvimento do produto (HU, 2013). A utilização dessa tecnologia possibilita a geração de geometrias complexas, fabricação sob demanda, redução de ferramental e

estoque, manufatura descentralizada e ágil, baixo impacto ambiental, aplicação de conceitos de fabricação digital, dentre outras vantagens. Nesse sentido, existem diferentes frentes de pesquisa baseadas nos conceitos de desenvolvimentos de produtos fabricados por manufatura aditiva (WHOLERS, 2017).

Normas ISO e ASTM padronizam a área de manufatura aditiva quanto às suas terminologias, processos, materiais, testes, projetos e formatos de arquivo. Isso engloba a diferenciação das técnicas existentes, feita com base no modo de deposição de camadas e no material de utilizado, nas seguintes categorias: fotopolimerização em cuba; jateamento de material; jateamento de aglutinante; extrusão de material; fusão em leito de pó; laminação de folhas e deposição direcionada de energia (ISO/ASTM 52900:2015; THOMPSON et al., 2016).

Figura 2 – Normas ISO e ASTM gerais para manufatura aditiva.

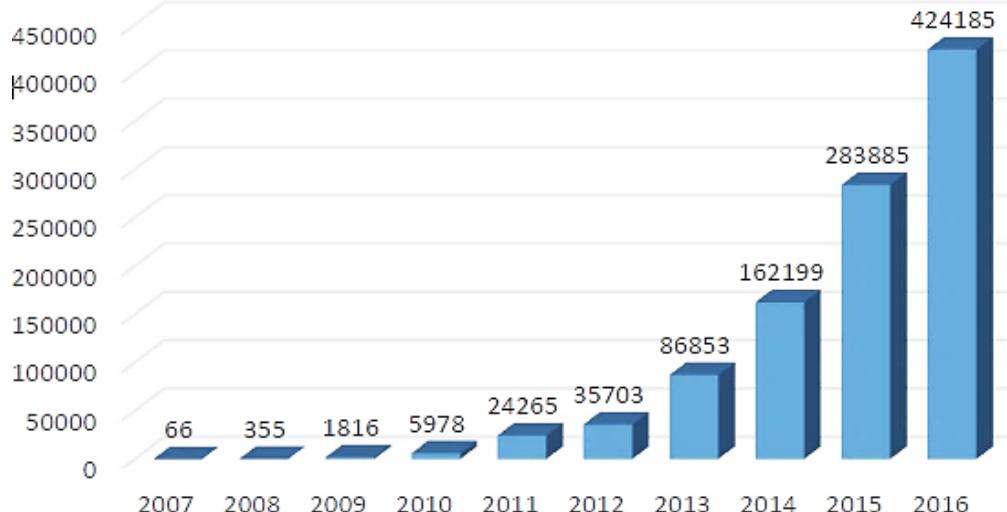


Fonte: Traduzido de Thompson et al (2016).

Os processos aditivos da classe de extrusão depositam material derretido por meio de um bico calibrado sob um substrato (VOLPATO, 2017). O processo atualmente conhecido como FFF, *Fused Filament Fabrication*, pertence à essa classe de processo por extrusão e teve a primeira patente registrada em 1988 pela empresa estadunidense Stratasys como FDM®, *Fused Deposition Modeling*

(CRUMP, 1988; TURNER; GOLD, 2015). Essa técnica é bastante difundida em equipamentos de manufatura aditiva comerciais de baixo custo, classificados como do tipo *low-end*, de modo que após a expiração da patente da Stratasys, em 2009, o número de vendas desse tipo de impressora 3D aumentou significativamente, conforme mostrado no gráfico da Figura 3 a seguir. (WHOLERS et al., 2017).

Figura 3 – Gráfico do número de impressoras 3D *low-end* vendidas a cada ano.

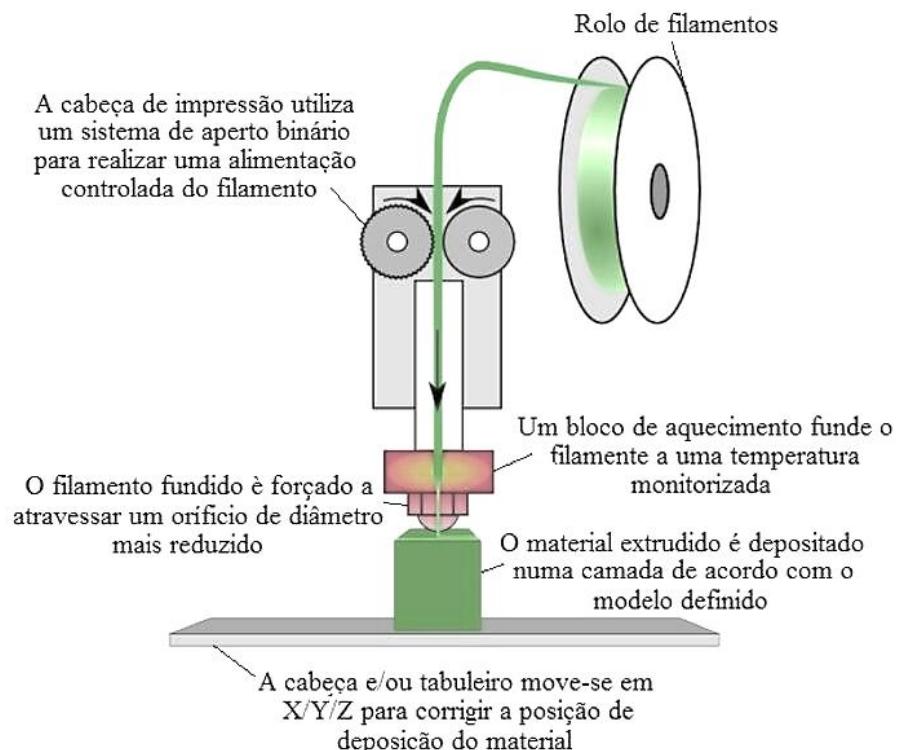


Fonte: Adaptado de Wohlers (2017).

O amplo uso da técnica FFF em impressoras *low-end* é devido à facilidade de implementação mecânica e menores custos envolvidos (WOHLERS et al., 2017). Nessa técnica, constrói-se a peça camada por camada através da deposição de material pelo cabeçote extrusor que se movimenta no plano XY. Ao finalizar uma camada a mesa se desloca em Z o equivalente a espessura de camada e, então, reinicia-se o processo de deposição para originar a camada subsequente, enquanto que a camada anterior sofre solidificação com o declínio de sua temperatura e, consequente, adere-se à nova camada (VOLPATO, 2017; WOHLERS et al., 2017).

Na técnica FFF o filamento que alimenta o subsistema de deposição, representado esquematicamente na Figura 4, é tracionado por dois roletes e aquecido para deposição através do bico extrusor. Esse aquecimento eleva a temperatura do material para mantê-lo em um estado semifundido. A extrusão ocorre de forma diferente da tradicional, ao invés de parafusos usa-se um sistema de rolamento de aperto binário (GIBSON et al, 2014).

Figura 4 – Representação esquemática do subsistema de deposição de uma impressora FFF.



Fonte: Moreira (2016).

2.1.2. Planejamento de processo

O planejamento de processo aditivo FFF, envolve as seguintes etapas: modelagem, conversão para STL, fatiamento, definição de parâmetros, impressão e pós-processamento. Essa seção aborda o planejamento de processo para a técnica FFF, mas muitos dos aspectos podem ser generalizados à outras técnicas de manufatura assistiva (GIBSON et al, 2014).

Figura 5 – Etapas de processo de manufatura aditiva

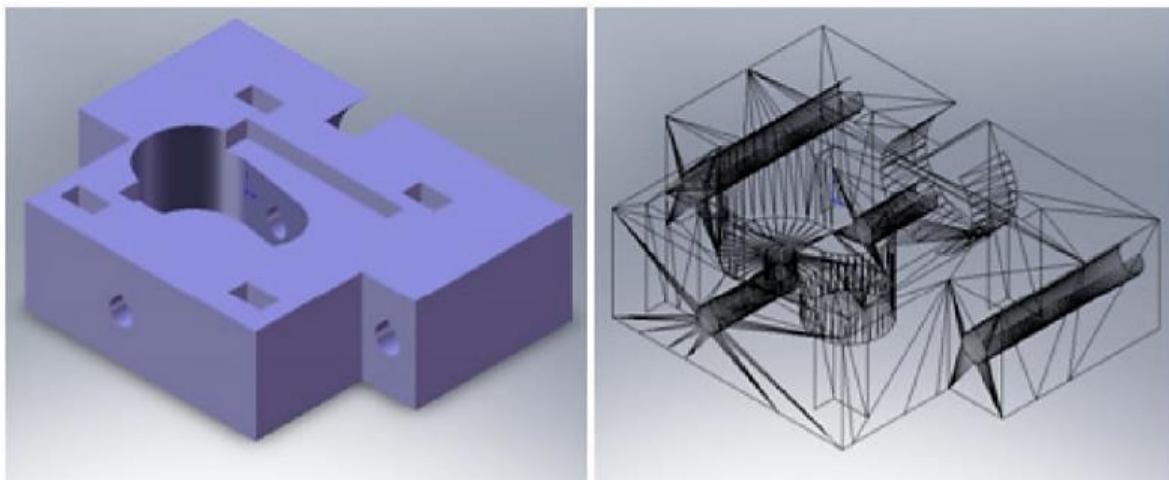


Fonte: Adaptado de Vitale; Cotteleer; Holdowsky (2016).

A primeira etapa do processo envolve a criação de um modelo tridimensional, geralmente isso é feito com software CAD (*Computer Aided Design*) devido à facilidade de uso e garantia de geração de um arquivo STL com número de erros reduzido. Entretanto, também é possível cumprir essa etapa de modelagem utilizando técnicas de engenharia reversa como escaneamento tridimensional ou fotogrametria de um objeto já existente. Porém, nesses casos é comum a necessidade de reparação do arquivo STL gerado, utilizando softwares específicos, devido aos possíveis erros existentes, como faces sobrepostas e faces abertas (GIBSON et al, 2014; JACOBS, 1992).

O formato STL, citado anteriormente, é definido pela norma ASTM F2792-12a como a interface padrão para os sistemas de manufatura aditiva, e consiste na representação geométrica da peça por uma malha de elementos triangulares, onde cada face é definida pelas coordenadas dos seus três vértices e pelo vetor normal à sua superfície (SZILVŠI-NAGY; MATYASI, 2003; CHUA; LEONG, 2014).

Figura 6 – Modelo CAD renderizado, na esquerda, e STL, na direita.



Fonte: Raulino et al. (2013).

A etapa seguinte é denominada fatiamento, nessa o modelo é dividido em várias seções transversais correspondentes a cada uma das camadas do objeto que será impresso. Essa etapa transforma contornos contínuos em degraus, sendo responsável pela imprecisão nomeada efeito degrau, detalhada mais adiante na seção 2.1.3.1 (SZILVŠI-NAGY; MATYASI, 2003; GIBSON et al, 2014).

Após o fatiamento, posiciona-se a peça na mesa de impressão. Esse posicionamento tem influência nos seguintes aspectos: tempo de impressão, visto que a velocidade de impressão na vertical é menor que no plano XY; necessidade de estruturas de suporte, devido à existência de regiões suspensas e inclinadas; resistência da peça, pois a anisotropia intrínseca ao processo faz com que a peça seja muito menos resistente na direção do eixo Z uma vez que as camadas tendem a descolar (GARRET; REDWOOD; SCHÖFFER, 2017; GIBSON et al, 2014).

Em sequência são determinados os demais parâmetros de impressão que podem influenciar nas propriedades da peça, os quais são abordados em maiores detalhes na seção 2.1.4 dessa monografia. Com os parâmetros definidos gera-se um código g com as instruções para impressão da peça, processo que acontece camada por camada de forma totalmente automatizada (GIBSON et al, 2014).

Após o término do processo de impressão, é necessário remover as estruturas de suporte caso existam, isso pode ocorrer de forma mecânica ou química caso o material de suporte seja solúvel. Quando a resolução da impressora não é suficiente para produzir o acabamento superficial desejado, existem ainda outras possíveis etapas de pós-processamento, como o lixamento da peça. Outra etapa que também pode ocorrer após a impressão é a de pintura (GIBSON et al, 2014).

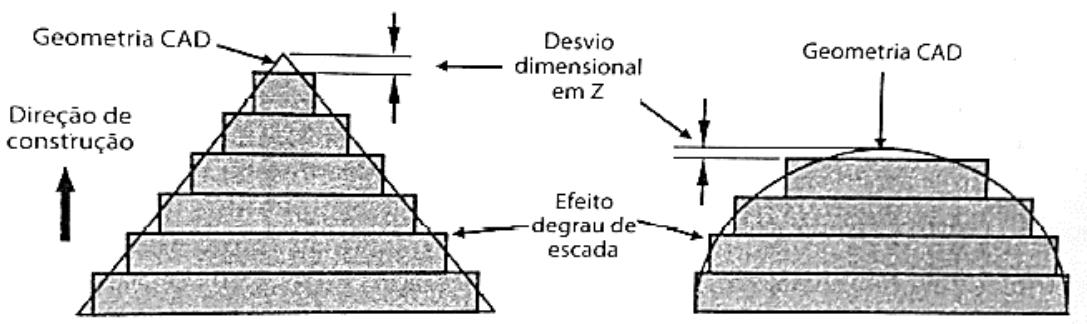
2.1.3. Características inerentes

Existem algumas características de fabricação e resultados que são inerentes ao processo de manufatura aditiva pela técnica FFF, visto que esse baseia-se na construção da peça por camadas, gerando assim as consequências detalhadas a seguir nessa seção: efeito degrau, anisotropia, desvios e erros dimensionais no eixo z, estruturas de base e suporte (VOLPATO, 2017).

2.1.3.1. Efeito degrau

O efeito degrau pode ser descrito como o desvio, entre o modelo geométrico computacional e a peça obtida, que acontece em regiões inclinadas em relação ao eixo de construção, devido à espessura da camada (VOLPATO, 2017). A Figura 7, a seguir, apresenta uma representação esquemática dessa característica.

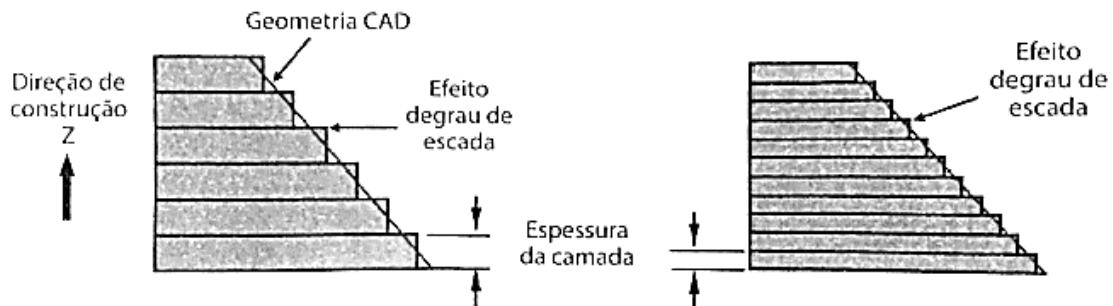
Figura 7 – Representação do efeito degrau.



Fonte: Volpato (2017).

Conforme exibido na Figura 8, a diminuição da espessura de camada tem implicação direta na redução do efeito degrau. Entretanto, é valido ressaltar que existem limitações de espessura de acordo com o equipamento (VOLPATO, 2017)

Figura 8 – Representação do efeito degrau em função da espessura de camada.

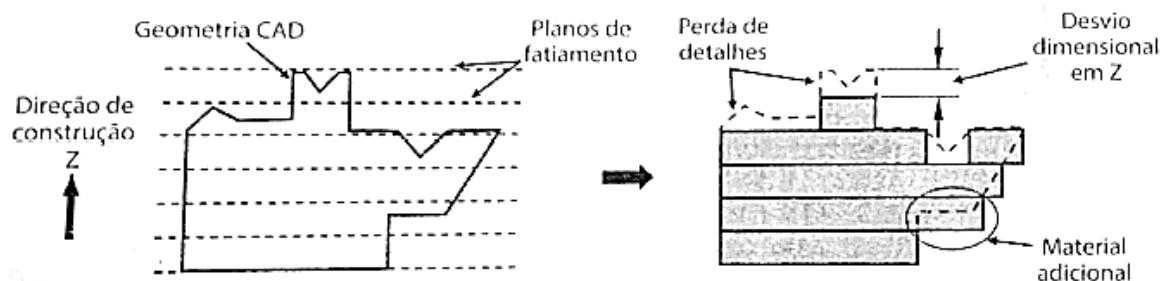


Fonte: Volpato (2017).

2.1.3.2. Desvios e erros dimensionais no eixo z (vertical)

Detalhes geométricos na direção vertical podem não ser contemplados na peça impressa devido aos limites do processo, sendo que os desvios podem chegar no máximo até o valor da espessura de camada utilizada (VOLPATO, 2017).

Figura 9 – Erros e desvios geométricos na direção z.

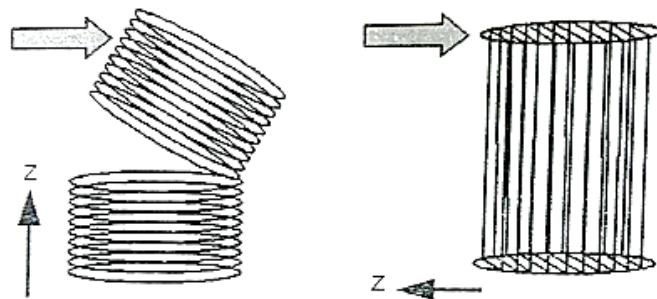


Fonte: Volpato (2017).

2.1.3.3. Anisotropia

Conforme explicitado anteriormente, a técnica FFF realiza a construção da peça por camadas. Isso resulta em propriedades mecânicas diferentes das obtidas em processos tradicionais, pois as direções preferenciais de construção atribuem condições de anisotropia à estrutura. De modo que a direção de construção vertical, eixo Z, na qual ocorre a sobreposição das camadas, apresenta resistência inferior devido à tendência de delaminação. A Figura 10 ilustra o efeito da anisotropia de acordo com o modo de construção da peça (LEE et al., 2007; VOLPATO, 2017).

Figura 10 – Efeito da anisotropia na aplicação de solicitação mecânica



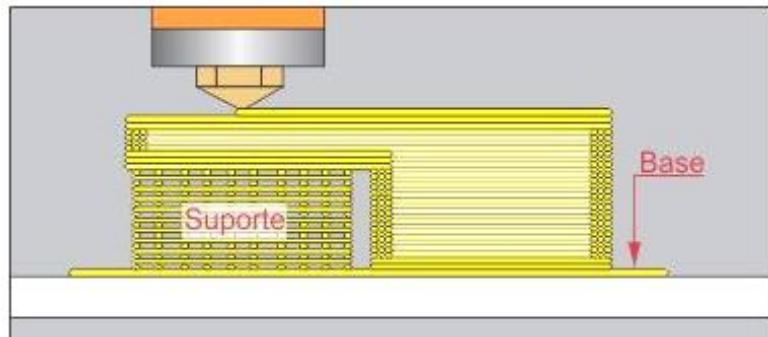
Fonte: Volpato (2017).

2.1.3.4. Base e estrutura de suporte

A base é formada por uma primeira camada de material que visa aumentar a área de contato da peça com a plataforma para ajudar a evitar descolamento durante o processo de impressão. Já as estruturas de suporte são construídas para não ocorrer impressão no vazio em regiões da peça que sejam suspensas ou com inclinações consideráveis. A construção dessas estruturas ocorre de forma que faz com que elas sejam facilmente removíveis após a impressão, para que assim reste somente a peça de fato (THOMPSON et al., 2016).

Essas estruturas adicionais podem ter como objetivo também: compensar empenamentos; possibilitar construção de peças com diferentes características geométricas; contribuir na fixação da peça à mesa de impressão; proteger a peça durante sua retirada após impressão (THOMPSON et al., 2016). A Figura 11 mostra um exemplo de peça utilizando base e com necessidade de estruturas de suporte devido à uma parte suspensa existente.

Figura 11 – Esquemático dos conceitos de base e suporte

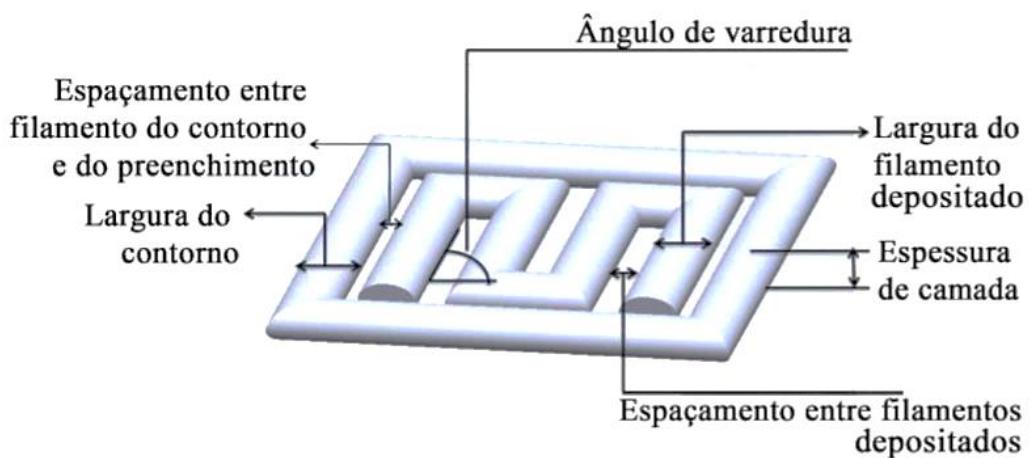


Fonte: software 3DClonerGen.

2.1.4. Parâmetros de processo

Peças manufaturadas pelo processo FFF podem ser avaliadas com base em índices técnicos e econômicos, os quais são diretamente influenciados por parâmetros de processo que alteram as propriedades micro e mesoestruturais da peça final. Nesse contexto, pode-se destacar como parâmetros de influência relevante: orientação de construção, espessura de camada, estratégia de preenchimento, porcentagem de preenchimento, número de contornos, velocidade de impressão, temperatura de extrusão, e características do material de impressão (SOOD, et al., 2012; VOLPATO, 2017).

Figura 12 – Parâmetros de processo na técnica FFF.

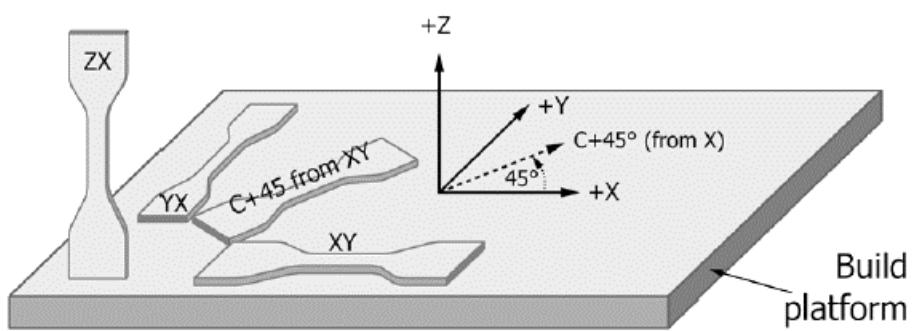


Fonte: Volpato (2017).

2.1.4.1. Orientação de construção

A orientação de construção tem interferência direta no tempo de fabricação da peça, e também nas propriedades mecânicas devido à anisotropia do processo, tema abordado com mais detalhes na seção 2.1.3.3. Esse parâmetro refere-se ao posicionamento da peça na mesa de impressão em relação aos eixos X, Y e Z, definidos pela norma ASTM D790-17 conforme mostrado na Figura 13 a seguir (SOOD et al., 2012; TOTI et al., 2012; VOLPATO, 2017).

Figura 13 – Orientação de construção



Fonte: ASTM D790-17 (2017).

Peças impressas nas direções dos eixos X ou Y com preenchimento retilinear apresentam estruturação interna análoga, $-45^\circ/+45^\circ$, já na direção mista XY ($C+45^\circ$) essa ocorre em $0^\circ/90^\circ$. Ou seja, existe uma distinção estrutural e isso relaciona-se relacionado às propriedades mecânicas da peça (VOLPATO, 2017). Segundo estudos de Afrose et al. (2015), peças construídas na direção X apresentam maior resistência a tração, já peças construídas na orientação mista ($C+45^\circ$) tem maior resistência à fadiga e maior tenacidade. Outro estudo realizado por Pei et al. (2015), reforça a análise de que a orientação X é a de maior resistência a tração, com uma diferença de até 25% em relação à Y, enquanto que a orientação mista ($C+45^\circ$) apresenta resposta intermediária.

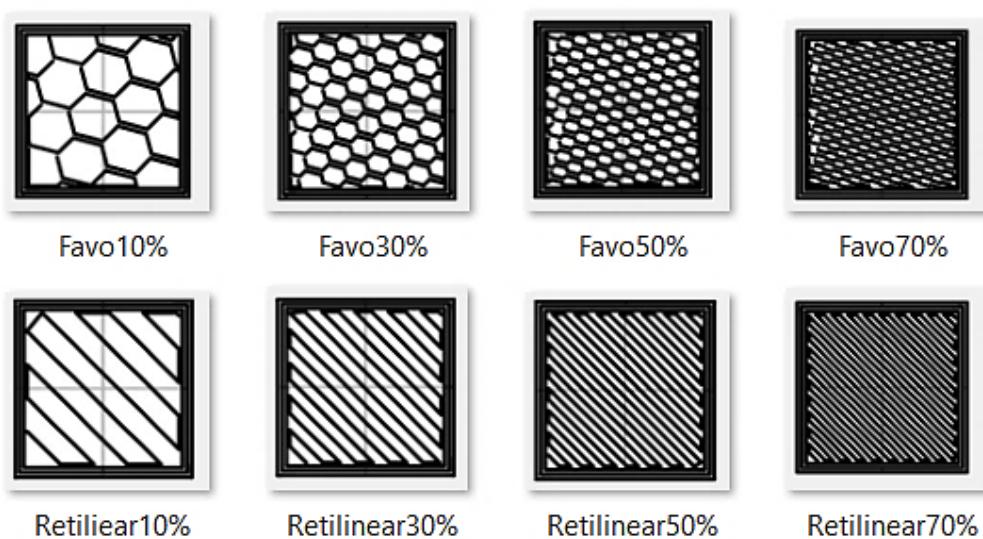
2.1.4.2. Espessura da camada

Conforme exposto anteriormente na Figura 12, a espessura da camada é o parâmetro referente à altura da camada depositada pelo bico extrusor. Uma espessura de camada pequena resulta em mais camadas, isso melhora o acabamento superficial da peça, porém aumenta o tempo de impressão. Enquanto que uma espessura de camada maior diminui o tempo de fabricação, mas reduz a qualidade superficial (SOOD et al., 2012; VOLPATO, 2017). Quanto às propriedades mecânicas, Santana (2015) recomenda utilizar uma espessura de camada inferior à 80% do diâmetro do bico extrusor, seu estudo com um bico extrusor de 0,4mm identificou que a resistência a tração foi superior para peças de 0,250 mm e 0,300 mm de espessura de camada.

2.1.4.3. Estratégia de preenchimento

A estratégia de preenchimento define como será a estruturação interna do objeto impresso. Estratégias mais simples como retilínea são executadas mais rapidamente, por outro lado estratégias mais complexas como favo, apesar de aumentarem o tempo de impressão, podem proporcionar maior resistência e rigidez à peça (VOLPATO, 2017). A Figura 14 ilustra as estratégias favo e retilínea, com diferentes porcentagens de preenchimento.

Figura 14 – Exemplos de estratégias e porcentagens de preenchimento



Fonte: software ClonerGen3D.

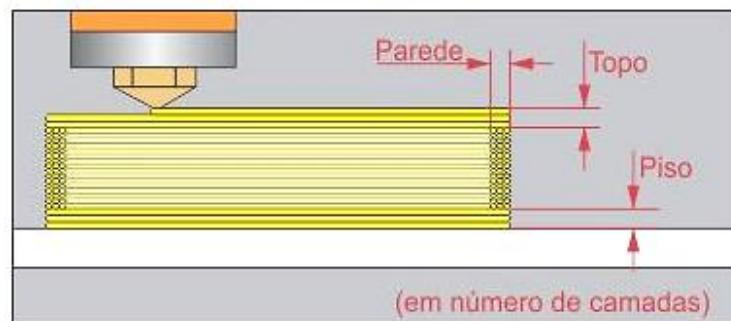
2.1.4.1. Porcentagem de preenchimento

A porcentagem de preenchimento de uma peça corresponde à densidade de material existente no seu interior. Esse parâmetro é ajustado percentualmente, um valor de 100% significa que a peça tem densidade máxima, em contrapartida um valor 0% indica uma peça oca. Quanto maior a porcentagem de preenchimento, maior a resistência da peça impressa (BRATL, 2013; FERNANDES, 2016). Na Figura 14 apresentam-se exemplos de diferentes porcentagens de preenchimento.

2.1.4.2. Número de contornos (parede, topo e piso)

Número de contornos corresponde ao número de perímetros construídos nas faces da peça (DOMINGOS-ESPIN et al., 2014). A Figura 15 demonstra o que são e qual a diferenciação dos tipos de contorno: parede, topo e piso.

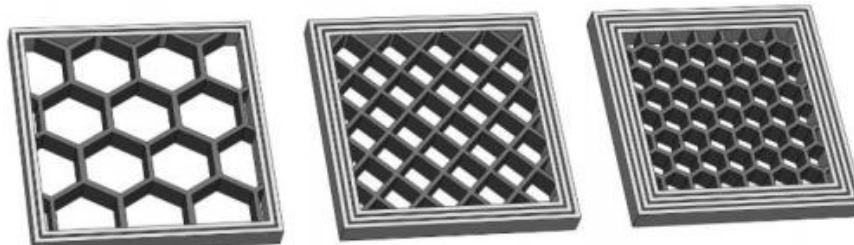
Figura 15 – Esquemático dos conceitos de parede, topo e piso.



Fonte: software ClonerGen3D.

Desse modo, a espessura dos contornos é dada pelo número de camadas externas construídas na peça. O incremento desse parâmetro pode elevar a resistência mecânica, porém é determinante no aumento do tempo de impressão e no consumo de material (BROWN, 2020; VOLPATO, 2017). A Figura 16 apresenta exemplos de construções com duas, três e quatro paredes respectivamente.

Figura 16 – Exemplos do número de paredes



Fonte: Brown (2019).

2.1.4.3. Velocidade de impressão

A velocidade de impressão é a de movimento do bico extrusor durante a construção da peça. Sendo que o processo de impressão é relativamente lento, pois a velocidade é limitada pelo fluxo de material do cabeçote extrusor, ou seja, pela taxa de extrusão. Porém, o incremento da velocidade de impressão, apesar de diminuir o tempo de fabricação, pode influenciar negativamente na qualidade da peça (CHUA; LEONG; LIM, 2010; STEPHEN; DALGARNO; MUNGUIAI, 2014).

2.1.4.4. Temperatura de extrusão

A adesão entre camadas é proporcionada pela energia térmica do material extrudado. Quanto mais elevada a temperatura de extrusão, menor é a viscosidade do polímero, e, por consequência, mais fracas são as conexões entre cadeias poliméricas, fazendo com que seja mais fácil as cadeias moleculares de uma camada de impressão ligarem-se às de outra, propiciando um número maior de ligações e, portanto, uma união mais forte entre camadas (SOOD et al, 2012). Por outro lado, quanto mais lento for o resfriamento, ou seja, quanto maior a diferença entre a temperatura de extrusão e a ambiente, mais tempo as cadeias moleculares têm para se reorientarem, gerando assim uma estrutura mais cristalina e, portanto, com comportamento mecânico mais frágil (EHRENSTEIN; THERIAULT, 2001).

2.1.4.5. Material de impressão

Os materiais mais empregados na técnica FFF são polímeros termoplásticos fornecidos por meio de filamentos arranjados em carreiros, com destaque para acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e poliácido lático (PLA) (VOLPATO, 2017). Apesar das diferenciações reconhecidas entre o ABS e PLA, ainda existem fatores que podem ser relevantes e foram pouco estudados, como por exemplo a cor do filamento. Em um estudo da Universidade Tecnológica de Michigan nos Estados Unidos, Wittbrodt e Pearce (2015) mostraram que existe influência da cor do filamento nas propriedades mecânicas das peças impressas. Esse estudo sugere haver uma temperatura crítica de impressão para cada cor de filamento que otimiza a cristalinidade e, portanto, as propriedades da peça final.

2.2. MATERIAIS DE ENGENHARIA: POLÍMEROS

2.2.1. Visão geral

Os polímeros são formados por diversas unidades químicas, chamadas de meros, repetidas ao longo de uma cadeia com ligações covalentes. De modo que o termo polímero tem origem na união das palavras gregas *poli*, muitos, e *mers*, unidade de repetição. A nomenclatura dos polímeros geralmente utiliza o nome do monômero como base junto ao prefixo *poli*, por exemplo, o poliestireno vem da polimerização do estireno (CALLISTER JR, 2008; CANEVAROLO JR, 2006).

Polimerização é o nome dado ao processo de junção de monômeros para formação de um polímero. Nesse sentido, os polímeros são classificados como homopolímeros quando sua cadeia polimérica apresenta apenas um tipo de mero, enquanto que se classifica como sendo um copolímero caso haja mais de um tipo de mero formando a cadeia (CALLISTER JR, 2008; CANEVAROLO JR, 2006).

Avanços científicos e tecnológicos estão contribuindo significativamente para o desenvolvimento de novos polímeros que visam atender requisitos das mais diversas aplicações. Nesse cenário, observa-se a necessidade de estudos em relação ao comportamento e desempenho mecânico de materiais poliméricos (CALLISTER JR, 2008; CANEVAROLO JR, 2006).

2.2.2. Termoplásticos

Termoplástico é uma categoria de polímeros em que a temperatura exerce papel importante na ductilidade do material. Quando submetidos a temperatura elevada, as vibrações moleculares tornam-se significativas e provocam quebra das ligações covalentes principais da cadeia, com isso o material torna-se deformável e pode ser moldado solidificando-se conforme o molde ao ser resfriado. Ou seja, termoplásticos são recicláveis (CALLISTER JR, 2008; CANEVAROLO JR, 2006).

Termoplásticos convencionais representam cerca de 90% da produção total de polímeros do mundo, são de baixo custo e fácil processamento, porém não apresentam boa resistência mecânica. Já os termoplásticos classificados como especiais são relativamente mais caros por apresentarem mais estabilidade térmica e química, além de propriedades como a transparência (CALLISTER JR, 2008; CANEVAROLO JR, 2006).

Outra categoria é a de termoplásticos de engenharia, materiais com elevada resistência mecânica, boa tenacidade e estabilidade dimensional. Além disso, existem também os termoplásticos de engenharia especiais, os quais apresentam em sua cadeia principal uma significativa quantidade de anéis aromáticos que contribui para aumentar a estabilidade térmica e suportar temperaturas superiores a 150 °C (CALLISTER JR, 2008; CANEVAROLO JR, 2006).

2.2.3. Ácido Polilático (PLA)

O ácido polilático (PLA) é um polímero biodegradável derivado do ácido láctico, que pode ser obtido por intermédio de fermentação bacteriana a partir de fontes renováveis como: beterraba, trigo e outros opções ricas em amido. De modo que o PLA se apresenta como um material sustentável, além de possuir muitas características equivalentes ou superiores à polímeros convencionais de origem petroquímica, tais como o polietileno, polipropileno e poliestireno (CARRASCO et al., 2010; NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010; RÓZ; GIESSE, 2003).

O PLA apresenta um reduzido impacto ambiental, é degradado por diversos microrganismos sob condições controladas e, portanto, pode ser considerado um material biodegradável. Em termos numéricos o PLA corresponde a cerca de 40% do uso total de plásticos não derivados do petróleo (LOKENSGARD, 2013). Outras propriedades interessantes desse polímero são a boa processabilidade e a biocompatibilidade (LIM; AURAS; RUBINO, 2008).

2.2.4. Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)

O copolímero acrilonitrila butadieno estireno (ABS) é um derivado do petróleo e apresenta boas propriedades mecânicas, eléctricas, químicas e ópticas, além de um custo relativamente baixo para aplicações de engenharia. Todavia, além da origem petroquímica, a liberação de monômeros tóxicos é um forte ponto negativo da utilização de ABS (SALINAS, 2014; HUNT et al., 2015). A obtenção do ABS acontece pela copolimerização dos monômeros acrilonitrila, butadieno e estireno. Processo que se inicia com a produção do copolímero de estireno e acrilonitrila, e é concluído na fusão com o polibutadieno (HARADA; WIEBECK, 2005). Os monômeros constituintes do ABS responsabilizam-se pelas propriedades do material da seguinte maneira: o estireno está relacionado ao brilho, moldabilidade e rigidez; a acrilonitrila oferece resistência térmica e química; o butadieno está ligado à resistência ao impacto e alongamento (DIFALLAH et al., 2012).

2.2.5. Politereftalato de Etileno (PETG)

O politereftalato de etileno glicol (PETG) é obtido a partir da combinação do politereftalato de etileno (PET), derivado do petróleo, com o glicol. Trata-se de um termoplástico amorfó aplicado industrialmente na produção de embalagens para alimentos e garrafas. Esse polímero vem ganhando espaço na área de manufatura aditiva, devido às suas características de flexibilidade, durabilidade e facilidade de impressão, apresentando-se como um material com propriedades intermediárias entre o ABS e o PLA (3DFILA, 2020a).

2.2.6. Poliuretano Termoplástico (TPU)

O poliuretano termoplástico (TPU) é um copolímero elastômero termoplástico biodegradável. Suas propriedades variam entre as características do plástico e da borracha, com diversos benefícios para utilização na manufatura aditiva, tais como: resistência à tração e elevado alongamento até a ruptura. Algumas variações do TPU possuem uma vida útil curta e necessitam de um tempo de secagem para finalizar o processo de fabricação (3DFILA, 2020b).

2.3. DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)

2.3.1. Visão geral

Design of Experiments (DOE) é o termo em inglês para um ramo da estatística aplicada utilizado para planejamento de experimentos com variação simultânea de fatores, o que permite extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil com um número mínimo de experimentos e, portanto, reduzir tempo gasto e custos envolvidos (BRUNS et. al., 2001; ANDERSON; WHITCOMB, 2016).

Em contraponto ao DOE, existe a abordagem tradicional de experimentos, denominada *One Factor at a Time* (OFaT), que trabalha com os fatores variados separadamente, ou seja, realiza a variação de um fator por vez. Entretanto, raras são as situações em que dois fatores atuam de forma realmente independente, normalmente observa-se interações entre os fatores, termo usado para se referir à influência mutua entre dois ou mais fatores. Portanto, é importante uma abordagem com variação de todos os fatores ao mesmo tempo, procedimento feito com uso de técnicas do DOE (BRUNS et. al., 2001; ANDERSON; WHITCOMB, 2016).

As técnicas do DOE trabalham com princípio da aleatoriedade, ou seja, as experiências devem ser realizadas aleatoriamente para reduzir efeitos de variáveis desconhecidas, bem como a possibilidade de uma dada experiência realizada depender da anterior ou influenciar a seguinte (ANDERSON; WHITCOMB, 2016). Observa-se, portanto, a importância da metodologia para atingir efetivamente o objetivo da realização de experimentos, que é aproximar satisfatoriamente a função que relaciona as entradas e saídas de um sistema. De forma que com esse conhecimento é possível compreender melhor o sistema em estudo, e assim determinar as melhores condições de operação (BRUNS et. al., 2001).

Nesse contexto, existem três aspectos importantes no DOE: fatores são as entradas dos experimentos, níveis são as configurações escolhidas para cada fator, e respostas são as saídas dos experimentos. Existem fatores experimentais, aos quais é possível especificar níveis; e fatores classificativos que não podem ser alterados, como, por exemplo, a idade. Outra possível distinção feita quanto aos fatores é se são quantitativos ou qualitativos (ANDERSON; WHITCOMB, 2016).

Denomina-se experimento fatorial completo quando são realizadas todas as combinações de fatores, e com isso pode-se determinar todas as interações existentes. Algumas vezes opta-se por um fatorial parcial, realizando uma fração das combinações, por motivos de tempo e custo. A quantidade de experimentos (NE) de um fatorial completo é dada pela equação abaixo, onde NF é o número de fatores e NN_i o número de níveis do fator i (ANDERSON; WHITCOMB, 2016).

$$NE = \prod_{i=1}^{NF} NN_i \quad (1)$$

No caso de um experimento fatorial completo sem réplicas é comum assumir que as interações de terceira ordem não são significativas e, portanto, podem ser utilizadas para estimativa de erro (ANDERSON; WHITCOMB, 2016).

A matriz de planejamento dos experimentos é uma tabela de todas as combinações dos vários níveis entre os diferentes fatores. Geralmente, por uma questão de simplificação, os fatores são designados na matriz por letras e os níveis por números (LANE, 2008; ANDERSON; WHITCOMB, 2016). Como exemplo para melhor compreensão do DOE, pode-se tomar um planejamento fatorial completo de dois níveis, que consiste em realizar experimentos em todas as possíveis combinações dos 2 níveis de cada um dos k fatores, exigindo assim a realização de 2^k experimentos. De modo que em um caso de um planejamento fatorial completo como somente dois fatores, A e B, tem-se um total de 4 experimentos, conforme mostrado na matriz experimental a seguir (MONTGOMERY, 2017).

Tabela 1 – Matriz experimental de um fatorial completo do tipo 2^2 .

Experimento	Fator		Notação
	A	B	
1	–	–	(1)
2	+	–	a
3	–	+	b
4	+	+	ab

Fonte: adaptado de Montgomery (2017).

O efeito principal indica a variação média na resposta de acordo com a mudança de nível do fator. Como exposto na equação (2), o efeito principal do fator A é por definição a diferença das médias das respostas em nível superior e inferior desse fator (MONTGOMERY, 2017).

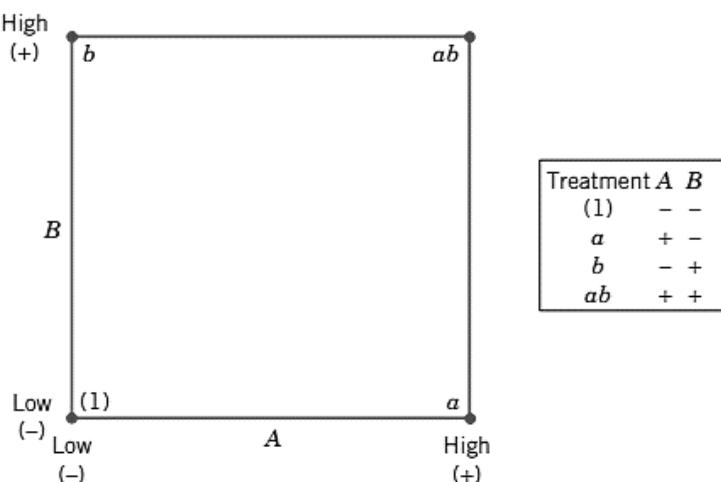
$$A = \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-} = \frac{a + ab}{2} - \frac{(1) + b}{2} \quad (2)$$

O processo é análogo para estimar o efeito principal do fator B. Entretanto é necessário interpretar os efeitos dos dois fatores conjuntamente, para elucidar a interação existente entre eles. Conforme mostrado na equação (3), o efeito de interação entre A e B é por definição a diferença média entre o efeito de A em nível superior de B e o efeito de A em nível inferior de B (MONTGOMERY, 2017).

$$AB = \frac{ab - b}{2} - \frac{a - (1)}{2} = \frac{ab + (1) - a - b}{2} \quad (3)$$

Ao representar o planejamento experimental num sistema cartesiano com um eixo para cada fator, define-se no caso de um experimento 2^2 um plano conforme exposto na Figura 17. Desse modo, existe uma interpretação geométrica para os efeitos: diferenças médias entre valores situados em arestas opostas e perpendiculares ao eixo do fator correspondente representam os efeitos principais; enquanto a interação entre os fatores é a diferença média entre as duas diagonais (MONTGOMERY, 2017).

Figura 17 – Representação geométrica de um experimento fatorial 2^2 .



Fonte: Montgomery (2017).

Através de um modelo de regressão, conforme expresso na equação (4), é possível realizar uma extração visando obter uma função que possa ser usada para representar a superfície de resposta do experimento (MONTGOMERY, 2017).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_{12} + \varepsilon \quad (4)$$

Nessa equação y é a resposta, e β são os coeficientes que podem ser atrelados aos fatores e interações dadas por x . Enquanto isso, o termo ε corresponde a representação dos erros. Primeiramente estima-se β_0 como a média das respostas conforme a equação (5) (MONTGOMERY, 2017).

$$\beta_0 = \frac{(1) + a + b + ab}{4} \quad (5)$$

Já β_1 e β_2 são estimados como a metade do valor do fator principal correspondente, de acordo com as equações (6) e (7). E β_{12} é estimado como a metade do valor da interação, conforme a equação (8) (MONTGOMERY, 2017).

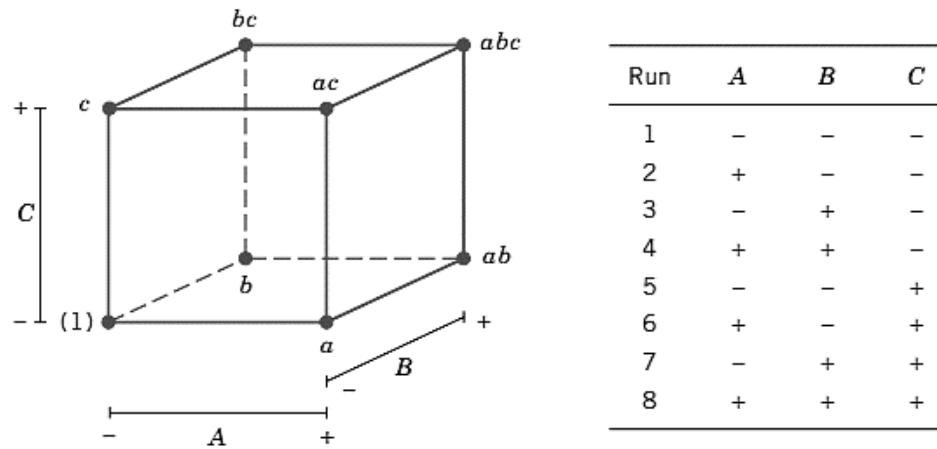
$$\beta_1 = \frac{A}{2} \quad (6)$$

$$\beta_2 = \frac{B}{2} \quad (7)$$

$$\beta_{12} = \frac{AB}{2} \quad (8)$$

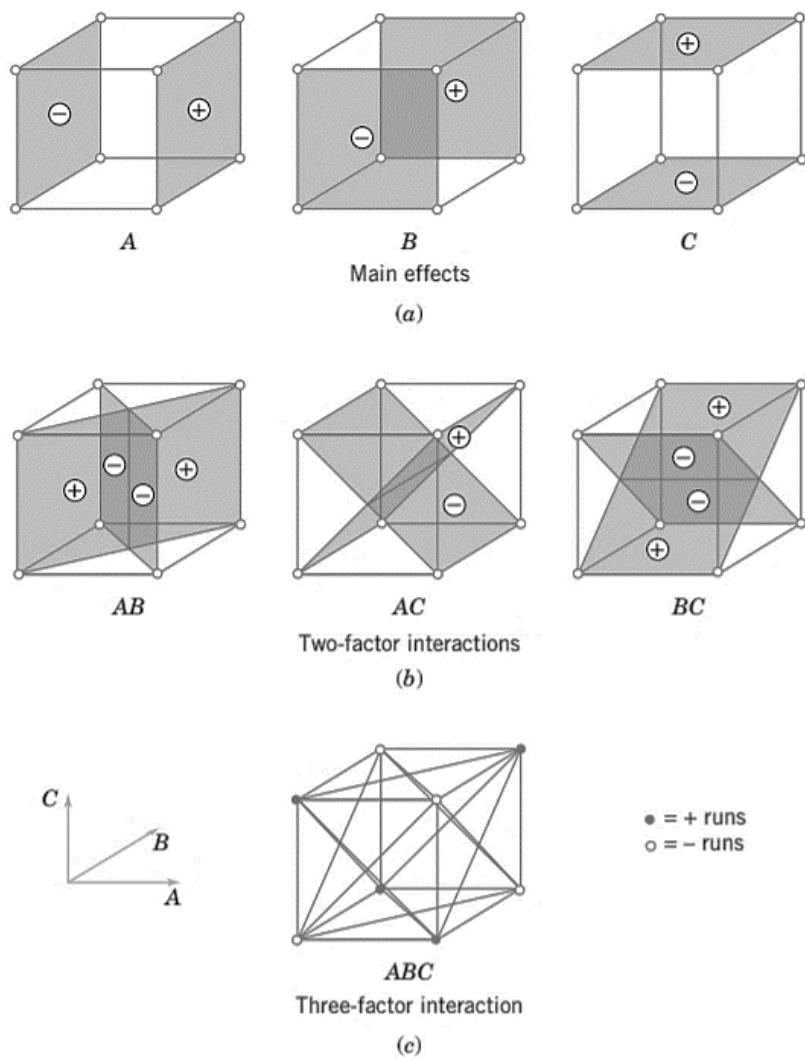
A análise anteriormente realizada para um planejamento fatorial completo de dois fatores com dois níveis pode ser expandida para existência de demais fatores e níveis. Um exemplo disso é um experimento 3^2 , três fatores com dois níveis, exemplificado na Figura 18, nesse caso a representação geométrica se dá por um cubo. Na Figura 19, tem-se graficamente a representação dos efeitos principais (a), interações entre dois fatores (b), e interações entre três fatores (c), respectivamente (MONTGOMERY, 2017).

Figura 18 – Representação geométrica e matriz de planejamento factorial 3^2 .



Fonte: Montgomery (2017).

Figura 19 – Representação geométrica planejamento factorial 3^2 , efeitos principais (a), interações entre dois fatores (b) e interações entre três fatores (c).



Fonte: Montgomery (2017).

2.3.2. Análise de variância (ANOVA)

Após a realização dos experimentos é necessário analisar as informações para obter conclusões acerca da significância estatística da influência dos fatores nas respostas. Um dos métodos mais utilizados para isso é a análise de variância (do inglês *analysis of variance - ANOVA*), uma ferramenta que usa regressão linear para determinar as relações entre os fatores e as respostas (LANE, 2008).

A ANOVA trabalha com teste de hipóteses, procedimento estatístico que permite analisar a validade de hipóteses com base em evidências amostrais. Sendo a hipótese nula H_0 e a hipótese alternativa complementar H_1 , divide-se o possível erro desse procedimento em duas categorias: erro tipo I é a incorreta rejeição de uma H_0 verdadeira, erro tipo II é a não-rejeição de uma H_0 falsa. O nível de significância α é definido como a probabilidade máxima permitida de se cometer um erro tipo I (LANE, 2008).

A primeira tarefa é o estabelecimento de H_0 , afirmando que inexiste relação entre um fator e uma resposta. Seguindo o procedimento estatístico de teste de hipóteses, pode-se concluir que existe em uma relação entre os dois fenômenos caso consiga-se rejeitar H_0 . Para cada uma das relações o procedimento da ANOVA fornece um valor-p, de modo que para todo valor-p menor que o nível de confiança α tem-se que H_0 é rejeitada, ou seja, quanto menor esse valor maior o nível de confiança na existência de correlação entre fator e resposta (LANE, 2008).

Tabela 1 – Tabela Genérica da ANOVA.

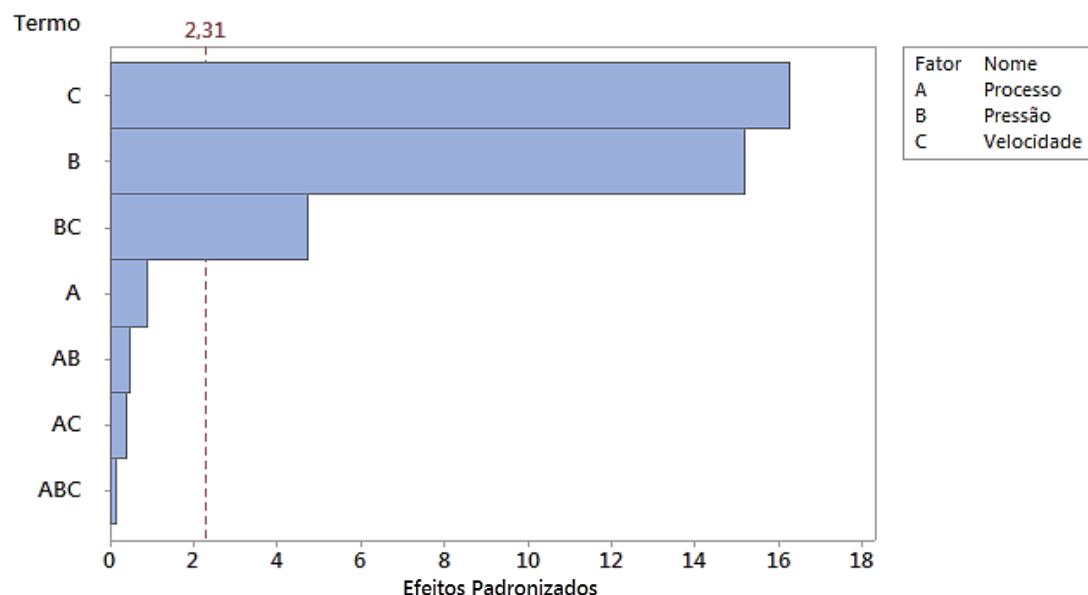
Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Médias quadradas	F
Fator	$SSF = \sum n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2$	$df_1 = k - 1$	$MSF = \frac{SSF}{df_1}$	$F = \frac{MSF}{MSE}$
Resíduo	$SSE = \sum \sum (\bar{x} - \bar{x}_i)^2$	$df_2 = N - k$	$MSF = \frac{SSE}{df_2}$	—
Total	$SST = \sum \sum (\bar{x}_i - \bar{x})^2$	$df_T = N - 1$	—	—

Fonte: adaptado de Montgomery (2017).

2.3.3. Principais resultados

Os principais resultados da análise incluem o gráfico de Pareto, valores-p, coeficientes, estatísticas de resumo do modelo, gráficos de resíduos, gráficos de efeitos principais e gráfico de interações. Inicialmente, utiliza-se o gráfico de Pareto, exemplificado na Figura 20, para comparar visualmente a magnitude relativa e a significância estatística dos efeitos principais e interações na resposta. Os efeitos nesse gráfico são mostrados de forma padronizada e a linha de referência tracejada indica quais são significativos com base no nível de significância de referência estabelecido para análise (MINITAB, 2019).

Figura 20 – Exemplo de um gráfico de Pareto de efeitos padronizados.

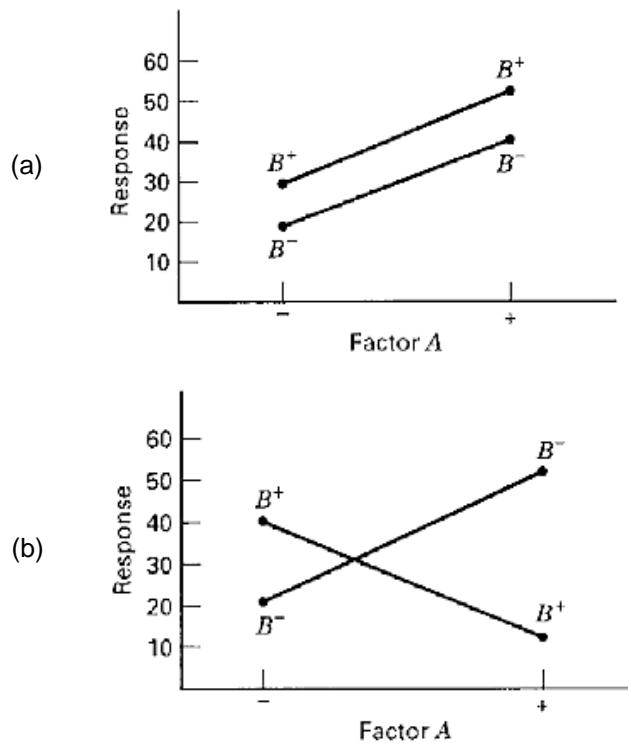


Fonte: Minitab (2019).

A partir dos dados da ANOVA, comparam-se os valores-p obtidos com o nível de significância de referência para avaliar a hipótese nula, de inexistência de relação entre fator e resposta, e assim determinar quais fatores exercem um efeito estatisticamente significativo na resposta, bem como quais interações entre fatores são relevantes. Caso o valor-p seja menor ou igual ao nível de significância, rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que a correlação é estatisticamente significativa. Caso contrário, não é possível concluir que existe associação estatisticamente significativa entre a variável de resposta e o fator estudado. Ressalta-se ainda que se houver vários termos sem significância estatística, pode-se reduzir o modelo removendo termos para possibilitar uma análise mais efetiva (MINITAB, 2019).

Após verificação de quais efeitos são estatisticamente significativos, parte-se para análise da forma com que esses se manifestam no sistema estudado. Nesse sentido, o gráfico de efeitos principais representa as médias para cada nível do fator, de modo que quanto maior a inclinação da linha que liga os pontos de média, maior é a magnitude do efeito principal. Ressalta-se que caso existam interações significativas entre os fatores, essas devem ser consideradas ao interpretar os efeitos principais. Existe interação entre fatores quando a média da resposta associada a um nível de um fator depende do nível de outro fator. Conforme mostrado na Figura 21, graficamente a interação entre fatores pode ser observada pelo não paralelismo das linhas (MINITAB, 2019).

Figura 21 – Experimento factorial sem interação (a) e com interação (b).



Fonte: Montgomery (2017).

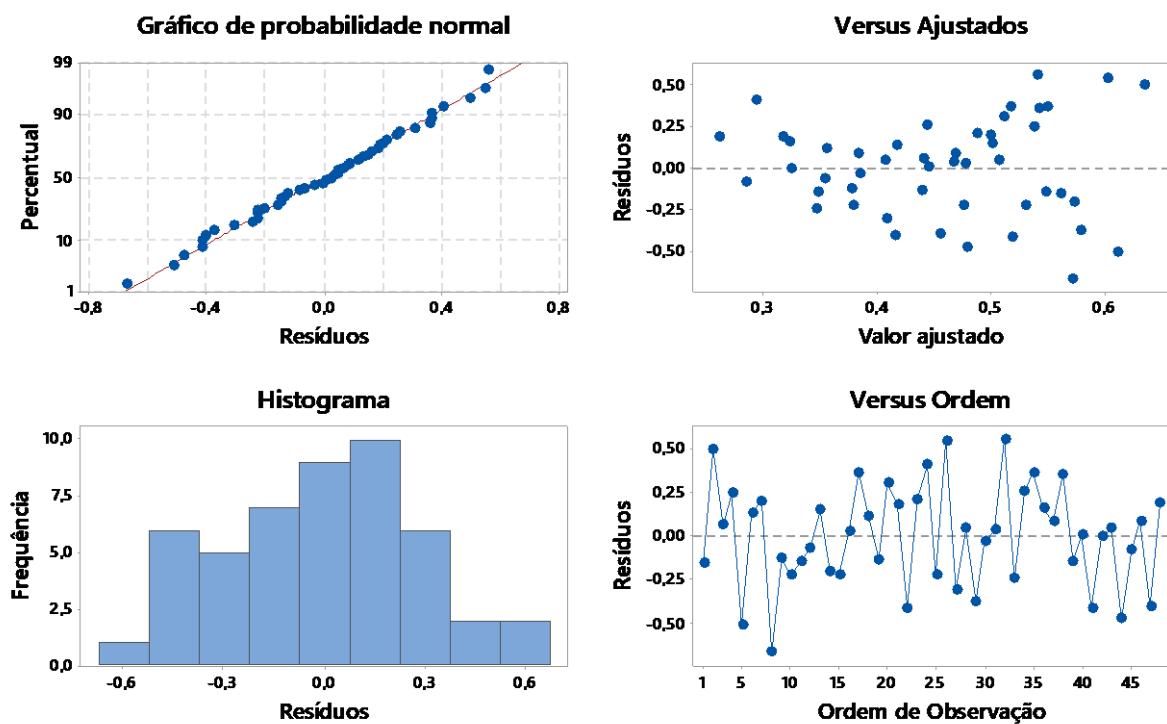
2.3.4. Verificações do modelo

As estatísticas de resumo ajudam a analisar quão bem o modelo se ajusta aos dados, entretanto para que esse seja considerado válido é importante verificar se os pressupostos considerados estão sendo satisfeitos (MINITAB, 2019).

Nesse sentido, uma das premissas do modelo gerado é a igualdade das variâncias das respostas. Para verificar isso geram-se gráficos de intervalos de confiança dos valores de desvio padrão para cada nível do fator baseado no nível de confiança ($1 - \alpha$). Se houver sobreposição de intervalos em todos os níveis, então considera-se que os desvios são suficientemente semelhantes. E como o desvio padrão é a raiz quadrada da variância, conclui-se também que as variâncias são suficientemente semelhantes e o modelo é válido em relação à essa premissa (LANE, 2008; ANDERSON; WHITCOMB, 2016; MINITAB, 2019).

A utilização da ANOVA também considera a premissa de que os resíduos têm distribuição normal e independente com variância constante. Para verificar essas pressuposições deve-se observar os gráficos de resíduos, do seguinte modo: o gráfico de probabilidade normal dos resíduos deve seguir aproximadamente uma linha reta; o gráfico de resíduos por ajustes não deve ter um padrão reconhecível; o gráfico de resíduos por ordem dos experimentos não deve apresentar um padrão ou tendência (LANE, 2008; ANDERSON; WHITCOMB, 2016; MINITAB, 2019).

Figura 22 – Exemplo de gráfico de um modelo válido.

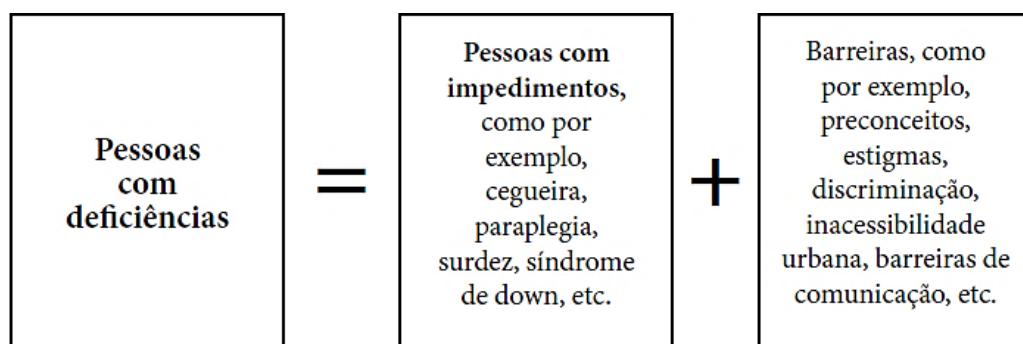


Fonte: Quirino (2019).

2.4. PESSOAS COM DEFICIÊNCIA

Em nossa sociedade a pessoa com deficiência ainda é vista como incapaz pelo senso comum. Porém, a incapacidade é resultado da interação existente entre a deficiência do indivíduo e a limitação ou restrição de suas atividades em contextos políticos e sociais, que podem atuar como facilitadores ou se tornarem barreiras ainda maiores para a inclusão do portador de deficiência (BERSCH, 2017).

Figura 23 – Pessoas com deficiência e barreiras sociais.



Fonte: Garcia (2014).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), deficiência é conceituada como uma alteração da estrutura ou funcionamento do corpo, de maneira que pessoas com deficiência podem ter limitações em atividades e restrições em interações sociais. Porém, esses aspectos citados são contornáveis e superáveis com políticas inclusivas eficientes e recursos assistivos adequados, de modo que por meio desse entendimento tem-se uma melhor compreensão e dissociação dos conceitos de deficiência e incapacidade (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1980).

Conforme decreto número 6949, de 25 de agosto de 2009, o Brasil é signatário da Convenção sobre os Direitos da Pessoa com Deficiência, documento que apresenta em seu primeiro artigo a seguinte definição de pessoa com deficiência:

“Pessoas com deficiência são aquelas que têm impedimentos de longo prazo de natureza física, mental, intelectual ou sensorial, os quais, em interação com diversas barreiras, podem obstruir sua participação plena e efetiva na sociedade em igualdades de condições com as demais pessoas” (BRASIL, 2009)

Essa abordagem é de fundamental importância, pois ao ser reconhecida como uma pessoa com deficiência, tem-se a colocação da deficiência em segundo plano e a prevalência da pessoa com seu protagonismo, peculiaridades, singularidades, e o mais importante: seus direitos (ZULIAN; FONSECA, 2013).

O fato de a sociedade muitas vezes ainda considerar pessoas com deficiência como incapazes provoca ações discriminatórias. Nesse sentido, a Convenção sobre os Direitos da Pessoa com Deficiência, visando combater esse problema, apresenta a seguinte definição de discriminações por motivo de deficiência:

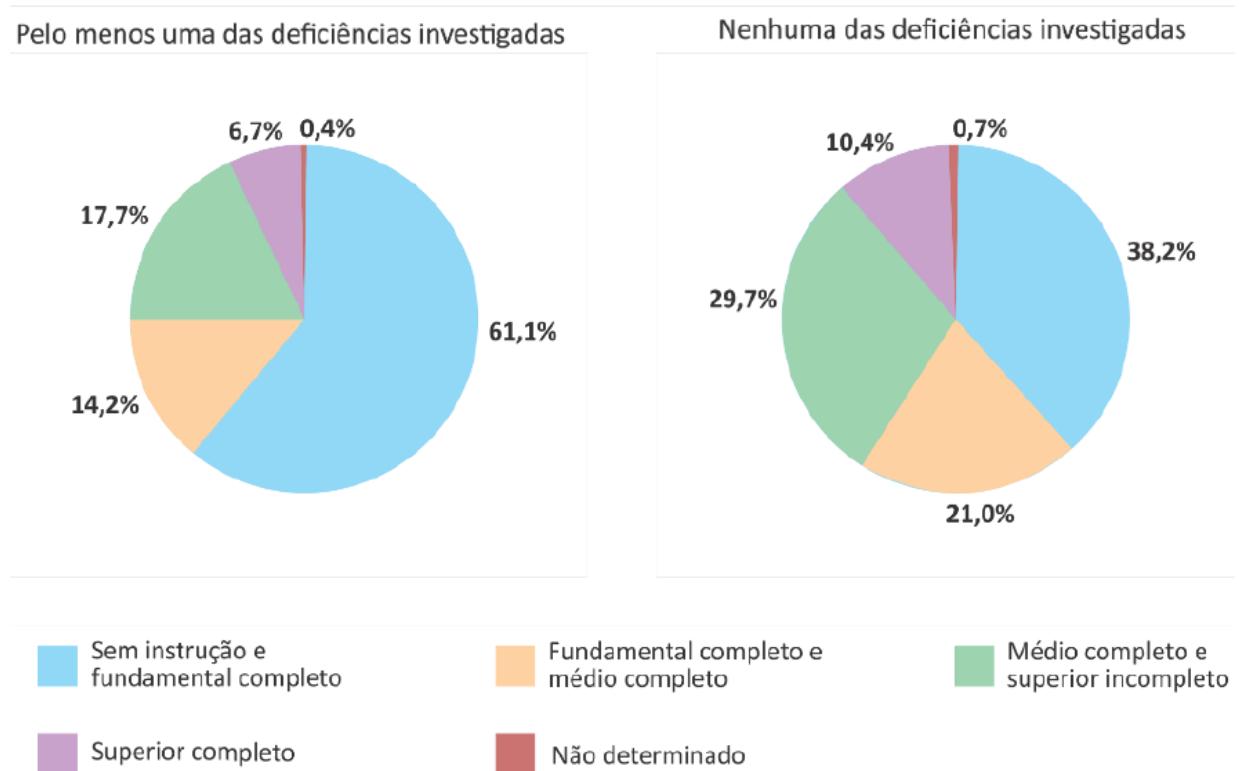
“Discriminação por motivo de deficiência significa qualquer diferenciação, exclusão ou restrição baseada em deficiência, com o propósito ou efeito de impedir ou impossibilitar o reconhecimento, o desfrute ou o exercício, em igualdade de oportunidades com as demais pessoas, de todos os direitos humanos e liberdades fundamentais nos âmbitos político, econômico, social, cultural, civil ou qualquer outro.” (BRASIL, 2009)

Todas as pessoas são potencialmente pessoas deficientes, porque condições de impedimento não são peculiaridades de um segmento específico da sociedade. Caso se viva tempo suficiente, a deficiência torna-se praticamente uma condição universal, haja visto que a velhice pode trazer impedimentos e diminuição das capacidades funcionais do indivíduo (DINIZ, 2013).

O cenário de envelhecimento populacional não é mais uma situação exclusiva dos países desenvolvidos. O panorama de aumento da expectativa de vida é um processo das sociedades modernas que está se concretizando ao redor do mundo, já se observa, por exemplo, um crescente movimento de inversão da pirâmide etária brasileira (SEGALLA; DA SILVA; PEDROSO, 2008; VERAS, 2009, OMS, 2012).

Os dados sobre pessoas com deficiências no Brasil são obtidos através do Censo, realizado a cada 10 anos pelo IBGE. O último censo, realizado em 2010, demonstrou que 23,9% dos brasileiros apresentavam pelo menos uma das deficiências investigadas (IBGE, 2010). A Figura 24 compara o nível de instrução da população sem e com deficiência, fator alarmante da exclusão social.

Figura 24 – Nível de instrução da população de 15 anos ou mais, com e sem deficiência.



Fonte: IBGE (2010).

Neri (2003), destaca que a necessidade de inclusão social é proveniente do fato de existirem pessoas marginalizadas e excluídas da sociedade, as quais encontram dificuldades em acessar seus direitos devido à sua situação social, raça, religião, deficiência ou outros aspectos. O processo de inclusão, portanto, caracteriza-se pela isonomia de direitos básicos, tais como acesso à educação saúde, segurança, informação, e outros pontos essenciais.

2.5. TECNOLOGIA ASSISTIVA

2.5.1. Visão geral

Dante do cenário apresentado na seção anterior, nota-se que a tecnologia assistiva tem importante papel como propulsora e promotora de inclusão social, por exemplo, uma pessoa com deficiência pode ter autonomia de mobilidade caso ela possua uma cadeira de rodas adequada e sua cidade tenha um planejamento urbano acessível. Ou seja, com a promoção de acesso aos recursos necessários a incapacidade e segregação podem ser transformadas em possibilidade funcional e participação. Essa transformação ocorre a partir de políticas e ações que visem inclusão social e ampliação funcional, através por exemplo do desenvolvimento de oportunidades efetivas de trabalho para pessoas com deficiência a partir de possibilidades de qualificação profissional (BERSCH, 2017).

Todos somos constantemente beneficiados pelo desenvolvimento tecnológico através de recursos que favorecem, agilizam e ampliam nossas atividades cotidianas. Nesse cenário, existem tecnologias, definidas como assistivas, que conseguem resolver ou reduzir limitações funcionais de pessoas com deficiência. Diante disso, tem-se que o conceito de tecnologia assistiva engloba um conjunto de produtos e serviços que contribuem para proporcionar ou ampliar habilidades funcionais de pessoas com deficiência, ajudando a promover maior independência, qualidade de vida e inclusão social através da consolidação das capacidades individuais (BERSCH, 2017).

“Para as pessoas sem deficiência a tecnologia torna as coisas mais fáceis.
Para as pessoas com deficiência, a tecnologia torna as coisas possíveis”.
(RADABAUGH, 1993)

Devido a sua finalidade, a tecnologia assistiva deve ser compreendida como um direito humano e social fundamental. Pois os dispositivos assistivos ajudam efetivamente as pessoas com deficiência a poderem se expressar, comunicar, movimentar, e realizar atividades cotidianas com maior eficiência e autonomia. Ou seja, para as pessoas com deficiência a tecnologia assistiva comprehende produtos e recursos de primeira necessidade (GARCIA, 2014).

Existe uma reunião de conhecimentos de diversas áreas na tecnologia assistiva, como por exemplo conhecimentos de fisioterapia, terapia ocupacional, medicina, engenharia mecânica e de materiais, dentre outras áreas. Isso potencializa e possibilita o desenvolvimento de dispositivos para auxílio de atividades funcionais, seja na comunicação, acessibilidade, adequação postural, mobilidade, adaptação veicular, ou outros cenários (GUIMARÃES, 2015).

A tecnologia assistiva acompanha o usuário em diferentes espaços, contextos e situações da sua vida cotidiana, sendo preciso diferenciar a tecnologia assistiva de outras tecnologias aplicadas na área médica e de reabilitação. No campo da saúde existem tecnologias para facilitar e qualificar a atividade dos profissionais em procedimentos de diagnóstico, tratamento e reabilitação, esses equipamentos não são tecnologia assistiva e sim tecnologia médica ou de reabilitação. A tecnologia assistiva é um recurso do usuário e não do profissional, ou seja, serve à pessoa que necessita desempenhar funções do cotidiano de forma independente e não ao profissional da área da saúde. O foco é o usuário, de modo que os recursos visam promover maior eficiência e autonomia em suas atividades (BERSH, 2017).

Nesse sentido, a participação do usuário é um ponto fundamental para que se evite ao passar do tempo o abandono ou a subutilização do dispositivo assistivo. De modo que a tecnologia assistiva visa também a formação dos usuários e familiares para que eles possam: adquirir habilidades de expressarem claramente as dificuldades que pretendem superar, serem ativos durante o processo de desenvolvimento do produto retroalimentando a equipe de profissionais com suas considerações feitas baseadas no conhecimento do problema e do ambiente onde a tecnologia será implementada, e por fim serem capazes de em conjunto aos profissionais definir qual a melhor solução que atenderá o problema específico (BERSCH, 2017).

2.5.2. Cenário brasileiro

No Brasil, em termos jurídicos, a pessoa com deficiência tem os seus direitos assegurados, perante o princípio de igualdade dos indivíduos, desde a Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988). Nesse sentido, destaca-se a posterior criação da Lei Federal 7.853, de 24 de novembro de 1989, que passou a estabelecer diretrizes para a proteção dos direitos das pessoas com deficiência à educação, saúde, trabalho, lazer, previdência social, amparo à infância e à maternidade. Essa lei classificou como crime e assegurou ao Ministério público o dever de combater o preconceito e a discriminação contra pessoas com deficiência (GARCIA, 2014).

Todavia, apesar dos direitos referidos ao cidadão brasileiro com deficiência, no início da década de 90 ainda havia uma abordagem assistencialista que se contrapunha aos princípios da inclusão social. Enquanto que em resposta à isso, observava-se um aumento da importância de iniciativas que focavam na ampliação de funcionalidades da pessoa com deficiência, visando superar suas limitações e propor mudanças de paradigmas nos conceitos de desenvolvimento de dispositivos assistivos relacionados à atividades cotidianas (ROCHA; LUIZ; ZULIAN, 2003). Nesse contexto, o primeiro uso da expressão “ajudas técnicas” na legislação brasileira veio a ocorrer no decreto número 3298, de 20 de dezembro de 1999.

“Consideram-se ajudas técnicas, para os efeitos deste Decreto, os elementos que permitem compensar uma ou mais limitações funcionais motoras, sensoriais ou mentais da pessoa portadora de deficiência, com o objetivo de permitir-lhe superar as barreiras da comunicação e da mobilidade e de possibilitar sua plena inclusão social.” (BRASIL, 1999)

Nesse percurso, em novembro de 2006, através da portaria de número 142, a Secretaria Especial dos Direitos Humanos da Presidência da República (SEDH/PR) instituiu o Comitê de Ajudas Técnicas (CAT). Os objetivos principais desse comitê são: apresentar propostas de políticas governamentais na área de tecnologia assistiva; estruturar diretrizes da área de conhecimento; detectar e estimular na esfera pública centros de referência com objetivo de formar uma rede nacional integrada; propor a criação de cursos e outras ações para qualificação de recursos humanos na área de tecnologia assistiva (BERSCH, 2017).

O Comitê de Ajudas Técnicas (CAT) aprovou, em 14 de dezembro de 2007, a seguinte definição de tecnologia assistiva (TA):

"Tecnologia Assistiva é uma área do conhecimento, de característica interdisciplinar, que engloba produtos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que objetivam promover a funcionalidade, relacionada à atividade e participação, de pessoas com deficiência, incapacidades ou mobilidade reduzida, visando sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social". (BRASIL, 2007)

Uma das justificativas para adoção da terminologia tecnologia assistiva, ao invés de ajudas técnicas, foi o uso já consolidado desse termo no meio acadêmico, organizações de pessoas com deficiência, setores governamentais, institutos de pesquisas e no mercado nacional de produtos da área. Além disso, tecnologia assistiva foi considerada uma denominação mais apropriada para atender ao objetivo de propor a estruturação de uma área de conhecimento. (BRASIL, 2007).

Dentre as iniciativas de políticas públicas brasileiras voltadas à tecnologia assistiva, destaca-se a implementação em 17 de novembro de 2011 do Plano Nacional dos Direitos da Pessoa com Deficiência - Viver sem Limite, por meio do decreto 7.612. O objetivo do plano é promover o pleno exercício dos direitos das pessoas com deficiência com base em quatro eixos principais: educação, saúde, acessibilidade e inclusão social (BRASIL, 2011)

O Plano Viver sem Limite instituiu pela portaria número 139, de 23 de fevereiro de 2012, o Centro Nacional de Referência em Tecnologia Assistiva (CNRTA), estruturado como uma rede de pesquisa, desenvolvimento e inovação. Outra ação do plano foi o lançamento do Catálogo Nacional de Tecnologia Assistiva, preparado e desenvolvido para oferecer informações online sobre mais de 1.300 produtos de tecnologia assistiva que são comercializados no Brasil. Além disso, houve ampliação da lista de produtos de tecnologia assistiva distribuídos pelo Sistema Único de Saúde (SUS), passando de um catálogo de cerca de 90 itens para algo em torno de 250 itens com qualidade superior aos da primeira lista devido às mudanças nas especificações exigidas (ZULIAN; FONSECA, 2013).

Em relação às ações mais recentes visando promover a inclusão e cidadania, além de assegurar os direitos das pessoas com deficiência, destaca-se a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Lei nº13.146, de 6 julho de 2015). Em seu artigo 74, estabelece-se a garantia de o acesso à tecnologia assistiva para pessoas com deficiência e o direito à reabilitação, incluindo disponibilidade de órteses e próteses através do SUS (BRASIL, 2015).

As políticas públicas são avanços consideráveis na efetivação do direito à tecnologia assistiva. Além de que são fundamentalmente necessárias, visto que o número de pessoas com deficiência está crescendo devido à fatores como o envelhecimento populacional e o aumento das taxas de sobrevivência de acidentes e doenças que antes eram fatais (GARCIA, 2014). Porém, apesar dos avanços em tecnologia assistiva e de constar na legislação brasileira o direito da pessoa com deficiência de ter acesso aos recursos de que necessitar, é notório que o Brasil se encontra apenas no início de uma longa jornada para o reconhecimento e a estruturação da área de tecnologia assistiva. O país apresenta ainda enorme déficit no atendimento da população necessitada, e mesmo diante dessa grande demanda reprimida existente o estágio nacional de incentivo à pesquisa e desenvolvimento nessa área é embrionário (BERSCH, 2017).

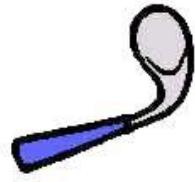
2.5.3. Categorias

A classificação da tecnologia assistiva por categorias é importante para organizar os recursos e oferecer focos específicos de trabalho e especialização. Historicamente, diferentes proposições foram feitas para categorização com base em distintas formas de organização e aplicação, pois, de uma maneira geral, as classificações atendem a públicos distintos, ou seja, atendem interesses em diferentes informações e níveis de detalhamento (BERSCH, 2017). Por exemplo, a categorização baseada em critérios de funcionalidade ou tipos de deficiência visa facilitar a disponibilização dos recursos existentes ao usuário final e aos profissionais em contato direto com as pessoas com deficiência. Nesse sentido, segundo Bersch (2017), pode-se dividir a área de tecnologia assistiva conforme os objetivos funcionais em doze categorias, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Categorias de tecnologia assistiva.

Auxílios para a vida diária:

Materiais e produtos para auxílio em tarefas rotineiras tais como comer, cozinhar, vestir-se, tomar banho e executar necessidades pessoais, manutenção da casa etc.

**Comunicação aumentativa (suplementar) e alternativa:**

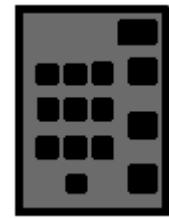
Recursos, eletrônicos ou não, que permitem a comunicação expressiva e receptiva das pessoas sem a fala ou com limitações da mesma. São muito utilizadas as pranchas de comunicação com os símbolos PCS ou Bliss além de vocalizadores e softwares dedicados para este fim.

**Recursos de acessibilidade ao computador:**

Equipamentos de entrada e saída (síntese de voz, Braille), auxílios alternativos de acesso (ponteiras de cabeça, de luz), teclados modificados ou alternativos, acionadores, softwares especiais (de reconhecimento de voz, etc.), que permitem as pessoas com deficiência a usarem o computador.

**Sistemas de controle de ambiente:**

Sistemas eletrônicos que permitem as pessoas com limitações moto-locomotoras, controlar remotamente aparelhos eletroeletrônicos, sistemas de segurança, entre outros, localizados em seu quarto, sala, escritório, casa e arredores.

**Projetos arquitetônicos para acessibilidade:**

Adaptações estruturais e reformas na casa e/ou ambiente de trabalho, através de rampas, elevadores, adaptações em banheiros entre outras, que retiram ou reduzem as barreiras físicas, facilitando a locomoção da pessoa com deficiência.



(continua...)

(...continuação)

Órteses e próteses:

Troca ou ajuste de partes do corpo, faltantes ou de funcionamento comprometido, por membros artificiais ou outros recursos ortopédicos (talas, apoios etc.). Incluem-se dispositivos protéticos para auxiliar nos déficits ou limitações cognitivas, como os gravadores de fita magnética ou digital que funcionam como lembretes instantâneos.



Adequação postural:

Adaptações para cadeira de rodas ou outro sistema de sentar visando o conforto e distribuição adequada da pressão na superfície da pele, bem como posicionadores e contentores que propiciam maior estabilidade e postura adequada do corpo através do suporte e posicionamento de membros.



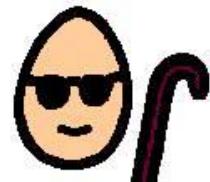
Auxílios de mobilidade:

Cadeiras de rodas manuais e motorizadas, bases móveis, andadores, scooters de 3 rodas e qualquer outro veículo utilizado na melhoria da mobilidade pessoal.



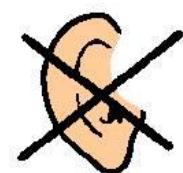
Auxílios para cegos ou com visão subnormal:

Auxílios para grupos específicos que inclui lupas e lentes, Braille para equipamentos com síntese de voz, grandes telas de impressão, sistema de TV com aumento para leitura de documentos, publicações, etc.



Auxílios para surdos ou com déficit auditivo:

Auxílios que inclui vários equipamentos (infravermelho, FM), aparelhos para surdez, telefones com teclado — teletipo (TTY), sistemas com alerta táctil-visual, entre outros.



Adaptações em veículos:

Acessórios e adaptações que possibilitam a condução do veículo, elevadores para cadeiras de rodas, camionetas modificadas e outros veículos automotores usados no transporte pessoal.



Fonte: adaptado de Bersch (2017).

2.5.4. Desenho universal

O desenho universal visa conciliar duas abordagens de desenvolvimento de produto que parecem conflitantes: uma com foco no mercado de massa de usuários comuns, e outra voltada às pessoas com deficiência que tem necessidades e limitações individuais específicas. Ou seja, a aplicação dos conceitos de desenho universal objetiva atender a todos através da consideração de aspectos como a acessibilidade, aceitação funcional e integração social (PLOS et al., 2012)

De acordo com a Convenção Internacional sobre os Direitos das Pessoas com Deficiência, deve-se assegurar e promover o pleno exercício de todos os direitos humanos e liberdades fundamentais das pessoas com deficiência. O desenho universal é uma das obrigações estabelecidas, conforme mostrado a seguir.

“Realizar ou promover a pesquisa e o desenvolvimento de produtos, serviços, equipamentos e instalações com desenho universal [...] que exijam o mínimo possível de adaptação e cujo custo seja o mínimo possível, destinados a atender às necessidades específicas de pessoas com deficiência, a promover sua disponibilidade e seu uso e a promover o desenho universal quando da elaboração de normas e diretrizes” (BRASIL, 2009)

Existem sete princípios fundamentais do desenho universal: equiparação de possibilidades de uso para pessoas com habilidades distintas; flexibilidade no uso para atendimento de uma ampla gama de indivíduos; uso intuitivo, simples e de fácil compreensão; informações claras e comunicação eficiente; controle de riscos e atenuação de possíveis consequências adversas; minimização do esforço físico; dimensões e espaços apropriados (STORY, 1998).

O conceito de desenho universal abrange a concepção de espaços, recursos e produtos que objetivam atender em simultâneo todas as pessoas, sejam quais forem suas características antropométricas e sensoriais. Isso deve ocorrer de forma autônoma, segura e confortável, constituindo elementos e soluções que compõem a acessibilidade. O desenho universal não exclui a necessidade de dispositivos assistivos para pessoas com deficiência, mas atua em conjunto para potencializar a qualidade de vida e inclusão social de todos (GALVÃO FILHO, 2009).

Esse tema é importante para a discussão sobre tecnologia assistiva, porque traz consigo a compreensão de que todas as realidades, ambientes e recursos, devem ser considerados no desenvolvimento de soluções que visam a participação, utilização e acesso de todas as pessoas. Ou seja, o propósito do desenho universal é viabilizar a participação social e o acesso à bens e serviços para a maior gama possível de pessoas, contribuindo assim para a inclusão social. De modo que, com a aplicação dos conceitos do desenho universal existe uma transição de realidades sociais de segregação, tutela e paternalismo, para uma realidade de cidadania e de sociedade inclusiva (GALVÃO FILHO, 2009).

O desenvolvimento do desenho universal possibilita a superação da ideia de projetos específicos, adaptações e espaços segregados, de forma que não é preciso investimento em reformas e adaptações para atendimento de grupos específicos de pessoas, uma vez que novos produtos e espaços sejam originalmente desenvolvidos visando atender a todos os possíveis usuários, independentemente de suas limitações. Ou seja, o desenho universal fundamenta-se na consideração nos projetos de questões de interesse universal, tais como limitações motoras ou sensoriais. Nesse sentido, defende-se, por exemplo, que banheiros devem ser projetados de forma que sejam acessíveis a todas as pessoas, ao invés de construir banheiros separados adaptados para pessoas com deficiência. (GALVÃO FILHO, 2009; BESCHER, 2017).

Além disso, é preciso o entendimento de que o desenho universal não se restringe exclusivamente à concepção e desenvolvimento de espaços e produtos. Ele abrange também ações educacionais preparadas e executadas considerando a diversidade existente e o seu valor na educação para todos. Nesse contexto, o desenho universal para aprendizagem é um conjunto de princípios que constituem um modelo prático para maximizar as oportunidades de aprendizagem para todos os estudantes. (GLASS; MEYER; ROSE, 2013; BESCHER, 2017).

3. ANÁLISE DO USO DE MANUFATURA ADITIVA NA ÁREA DA SAÚDE

3.1. DESAFIOS E BENEFÍCIOS

Em qualquer área da saúde, pesquisas, análises, testes e experimentos são fundamentais para obtenção de conteúdos que possam ser avaliados e verificados a partir de uma perspectiva científica. Nesse cenário, tecnologias inovadoras desempenham papel importante por apresentarem objetivos de longo prazo para melhoria da qualidade, segurança, eficácia e custo. Ou seja, são necessários novos conceitos, ideias, serviços, processos e produtos para ajudar em tratamentos, diagnósticos, prevenções e investigações. Diante disso, tem-se a possibilidade de aplicação de diversos conceitos de engenharia, tais como: planejamento estratégico, desenvolvimento de produtos, seleção de materiais, uso de tecnologia, análise de custos, entre outros (HORIZONTE, 2012; OMACHONU, 2010).

Nesse contexto, as aplicações de manufatura aditiva na área da saúde são diversas, mediante as possibilidades de customização das soluções de acordo com as necessidades de cada paciente. Além disso, dentre outros aspectos positivos destacam-se a capacidade de fabricação de objetos com geometrias complexas, e a redução de erros e do tempo necessário para a execução de procedimentos cirúrgicos devido ao uso de guias impressos (NETO et al., 2015).

Os guias cirúrgicos, citados no parágrafo anterior, são protótipos biomédicos fabricados por impressão 3D usados para planejamento de procedimentos através de fornecimento de informações detalhadas sobre a anatomia do paciente, o que traz a possibilidade de um planejamento singular para cada caso. Esses guias cirúrgicos feitos por manufatura aditiva possibilitam um aumento da assertividade dos procedimentos cirúrgicos, além de redução de tempo e de custos envolvidos (BENCHARIT, 2018; ROSA; OLESKOVICZ; ARAGÃO, 2004).

Dentre as áreas da saúde que mais se beneficiam de guias assim, o destaque é para a bucomaxilofacial. Área na qual a manufatura aditiva é empregada na fabricação de guias cirúrgicos e moldes para próteses customizadas, itens utilizados em cirurgias de reconstruções ósseas e de reparação de deformidades (TENÓRIO et al., 2015).

Atualmente já existe o reconhecimento de que a manufatura aditiva cumpre um papel importante no desenvolvimento de órteses e próteses personalizadas, no estudo de anatomia e no planejamento cirúrgico não invasivo. Nesse contexto, reconhece-se que ainda há muito espaço para abordagens inovadoras em relação ao uso de impressão 3D na área da saúde, as quais podem impulsionar novas pesquisas e evoluções tecnológicas. Todavia, apesar dos avanços e da eminente evolução, a manufatura aditiva ainda não é parte da realidade da maioria dos grandes centros devido à heterogeneidade de recursos e de desenvolvimento dos países. Para ultrapassar essas barreiras é preciso difundir de forma eficiente o conhecimento e o acesso às tecnologias de impressão 3D, de forma que mais pessoas na área da saúde possam utilizá-las (NETO, 2018; TENÓRIO, 2018).

Tabela 3 – Resumo da aplicação de manufatura aditiva na área da saúde.

Drogas orais	Vantagens: produção de estruturas complexas, precisão da dosagem, conveniência, tempo. Limitações: controle técnico e qualidade.
Drogas transdérmicas	Vantagens: invólucros precisos e adaptáveis, estabilidade térmica, capacidade de carga; manipulação da liberação das drogas. Limitações: controle técnico e qualidade.
Implantes de estrutura dura	Vantagens: geometrias complexas e versáteis, alta precisão, exatidão, acabamento superficial e integridade estrutural, controle da arquitetura porosa, durabilidade. Limitações: possíveis falhas do implante.
Implantes de estrutura mole	Vantagens: recriar estruturas e células compatíveis; melhoria de funções das células dos órgãos. Limitações: viabilidade e o controle da proliferação celular.
Ferramentas de diagnóstico	Vantagens: aumento de informações para planejamento pré-operatório, visualização da anatomia do órgão específico do paciente. Limitações: longo tempo de impressão.
Próteses	Vantagens: customização, alta resistência, peso reduzido. Limitações: funções e mobilidade.
Órteses	Vantagens: customização, alta resistência, peso reduzido, bom ajuste. Limitações: falta de interface clínica e de design; rendimento e custo de material não econômicos; resistência limitada do material.
Ferramentas cirúrgicas	Vantagens: permite uma experiência de operação mais controlada e simplificada, personalização específica para o paciente; redução do custo das ferramentas. Limitações: desempenho limitado.

Fonte: adaptado de LI et al (2020).

3.2. DISPOSITIVOS ASSISTIVOS

3.2.1. Visão geral

A manufatura aditiva pela técnica FFF é um dos modelos produtivos de maior flexibilidade, permite alta complexidade geométrica das peças com baixo custo e simplicidade em comparação a processos tradicionais, tais como usinagem. Essas características favorecem a personalização com viabilidade econômica e, portanto, são interessantes e valiosas para a fabricação de dispositivos assistivos acessíveis (ISHENGOMA; MTAHO, 2014; VENTOLA, 2014).

O desenvolvimento de produtos de tecnologia assistiva difere do de produtos fabricados em série, cujo principal atributo é a intercambialidade. Observa-se, portanto, que as principais vantagens da fabricação de dispositivos assistivos através de manufatura aditiva estão relacionadas à personalização para o usuário mediante o aumento da sua participação nas etapas que constituem o processo de desenvolvimento do produto, algo que dificilmente seria alcançado com métodos de fabricação convencionais. Nesse sentido, a individualização dos dispositivos, possibilitada pelo uso da impressão 3D, contribui para a aceitação e satisfação por parte do usuário, pois propicia um produto com mais qualidade, eficácia e conforto (FERRARI et al., 2019; HU, 2013; HURST; KANE, 2013; PATERSON et al., 2015).

A associação entre manufatura aditiva e tecnologia assistiva é uma temática ainda recente e em expansão, tornou-se tema foco de pesquisas apenas no início do ano de 2012. Sendo países desenvolvidos como Reino Unido, Estados Unidos e Itália os que mais concentram a produção científica nesse tema. (FERRARI et al., 2019). No Brasil já existem diversos centros de pesquisa, laboratórios e até mesmo iniciativas privadas, com engajamento em atividades que ligam a manufatura aditiva ao campo da tecnologia assistiva. Porém, ainda existe considerável espaço para progresso e evolução desse tema no cenário mundial (BUEHLER et al. 2016).

As paraolimpíadas de 2012, em Londres, proporcionaram grande visibilidade ao emprego da manufatura aditiva na fabricação de produtos na área de tecnologia da assistiva. Foram construídos, por exemplo, assentos anatômicos personalizados para os atletas paraolímpicos do basquete utilizando manufatura aditiva. Também em 2012, a empresa Stratasys, desenvolveu um exoesqueleto customizado e para uma criança com artrogripose múltipla congênita, doença que a impossibilitava mover os braços. O exoesqueleto, *Wilmington Exoskeleton*, permitiu à criança movimentos para brincar, desenhar, alimentar e abraçar (DA SILVA; MAIA, 2014).

Destacam-se como matéria-prima para produção de dispositivos assistivos através de manufatura aditiva o ABS e o PLA, esses materiais apresentam significativa resistência mecânica e custo relativamente baixo (FERRARI et al., 2019). Vale ressaltar que em relação à aplicação desse processo produtivo dentro de ambientes de saúde, opta-se pela utilização do PLA devido a toxicidade do processo com ABS (HUNT et al., 2015). Quanto à tecnologia de impressão 3D utilizada na área de tecnologia assistiva, na grande maioria das vezes opta-se pela técnica FFF, o que pode ser explicado pelo custo acessível e pela possibilidade de criação de peças resistentes através dessa técnica (FERRARI et al., 2019).

Em relação as categorias de tecnologia assistiva, existe uma diferença significativa entre o número de estudos relacionados à aplicação de manufatura aditiva na produção de órteses, próteses e acessórios, em comparação às demais categorias (RENGIER, 2010; KAYE et al, 2016). Conforme levantamento realizado por Ferrari et al. (2019), as aplicações voltadas à essas categorias de dispositivos assistivos correspondem à mais de 70% da produção científica da área, isso pode ser observado no gráfico mostrado na Figura 25. Esses dispositivos podem ser fabricados por manufatura aditiva visando customização para atendimento das individualidades do usuário, além de proporcionar uma redução de custo, tempo de produção e quantidade de consultas se comparado com a forma tradicional de fabricação de órteses e próteses (SANTOS et al., 2016).

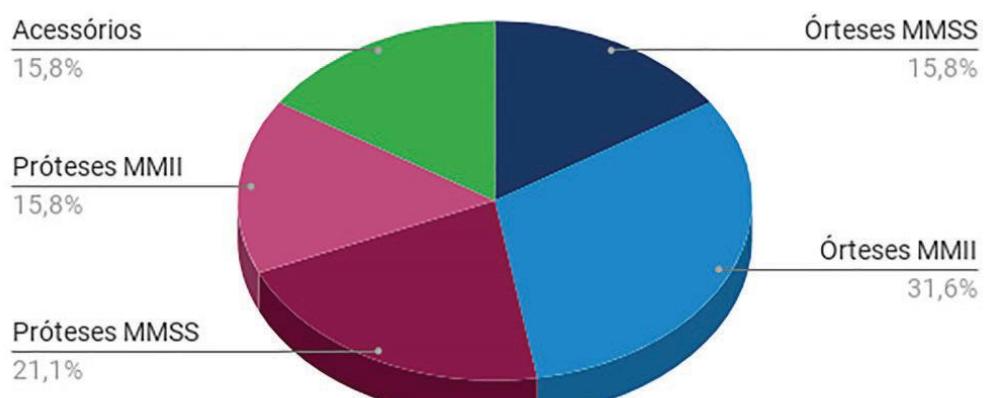
Figura 25 – Porcentagem de artigos publicados por categorias de tecnologia assistiva de 2012 a 2018.



Fonte: Ferrari et al. (2019).

Conforme mostrado no gráfico da Figura 26, embora dentro da categoria de órteses e próteses a maioria dos estudos sejam relacionados à dispositivos para membros inferiores (MMII), é pequena a diferença em relação a quantidade de estudos de dispositivos para membros superiores (MMSS) (FERRARI et al., 2019).

Figura 26 – Quantidade de estudos 2012 a 2018 por tipos de órteses, próteses e acessórios.



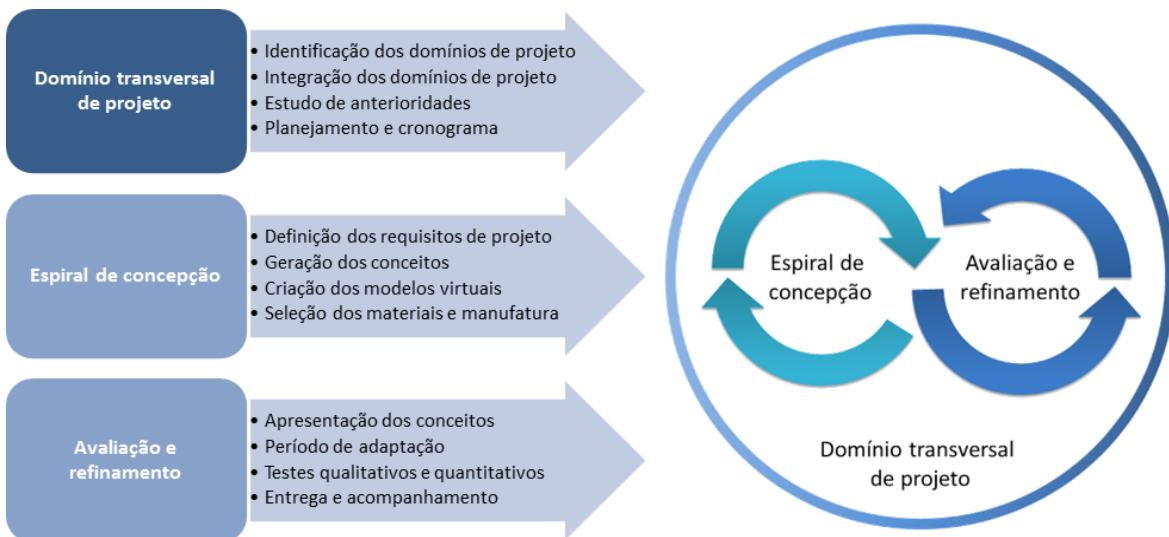
Fonte: Ferrari et al. (2019).

Existe o reconhecimento de que são condições fundamentais para o condução de soluções técnicas assertivas no desenvolvimento de dispositivos assistivos o uso de técnicas e metodologias que contribuam na construção efetiva de um repertório interdisciplinar envolvendo áreas da saúde e engenharia, além da participação direta do usuário para compreensão de suas reais necessidades e demandas (HARRIS, 2017; KING, 1999; OSTUZZI et al, 2015).

Durante esse processo de desenvolvimento do dispositivo assistivo, devem existir avaliações de protótipos funcionais visando diminuir o risco de rejeição e abandono. Nesse sentido, existe o reconhecimento de que são indispensáveis estudos, pesquisas e testes funcionais para o desenvolvimento de dispositivos eficientes de tecnologia assistiva. De modo que é fundamental envolver durante o processo conhecimentos de seleção de materiais, tecnologias, ergonomia e usabilidade, para que se possibilite e potencialize o aperfeiçoamento de técnicas, materiais, métodos e procedimentos, visando a redução de custos e aumento da eficácia dos produtos (BARBOSA; TEIXEIRA-SALMELA; DA CRUZ, 2016).

A tecnologia assistiva é uma área que demanda foco nas especificidades do usuário, através da integração de conhecimentos e experiências multidisciplinares. Nesse contexto, Santos e Silveira (2020) propuseram uma metodologia centrada no usuário para o desenvolvimento de dispositivos assistivos, nomeada AT-d8sign. A primeira fase da metodologia é o domínio transversal de projeto, que envolve a integração dos domínios de interesse para criação da estrutura fundamental de conhecimentos, habilidades e experiências úteis ao projeto. A segunda fase é o espiral de concepção, na qual conceitos e soluções são elaborados e melhorados iterativamente com auxílio de ferramentas técnicas e protótipos. A terceira fase da metodologia compreende a validação e o refinamento da solução, portanto nessa é feita a avaliação da funcionalidade e eficácia do dispositivo, bem como da satisfação do usuário e dos demais interessados, a fim de retroalimentar a fase anterior de concepção e gerar um ciclo de melhoria (SANTOS; SILVEIRA, 2020).

Figura 27 – Metodologia AT-d8sign (fases e tarefas).



Fonte: adaptado de Santos e Silveira (2020).

3.2.2. Órteses

Órteses são dispositivos de tecnologia assistiva utilizados em diversos contextos, como, por exemplo, para facilitar a cicatrização pós-cirúrgica, manter ou promover amplitude articular, prevenir ou corrigir deformidades, imobilizar ou limitar amplitude de movimento, manter alinhamento, dentre outras possíveis aplicações (EDELSTEIN; BRUCKNER, 2006; VAN PETTEN, 2014). O uso de uma órtese não elimina a necessidade de tratamento fisioterapêutico, conforme prescrição médica, porém em alguns casos pode ajudar a adiar ou até mesmo evitar procedimentos cirúrgicos (ALON; MCBRIDE, 2003; SOUZA; CEZARINI; MATTIELLO-SVERZUT, 2015).

Para promover melhorias funcionais ou evitar agravamento de problemas do usuário, as órteses atuam como sistemas exoesqueléticos que buscam manter determinada parte do corpo na posição funcional mais adequada. Ou seja, são acopladas em um segmento do corpo para garantir melhor posicionamento, estabilidade e funcionalidade. Dessa maneira, a utilização de uma órtese visa benefícios terapêuticos e funcionais que podem estar relacionados à limitação ou assistência de movimento, transferência de força e proteção de partes do corpo (BERSCH, 2013; EDELSTEIN; BRUCKNER, 2006; CARVALHO, 2006)

As órteses devem ser suficientemente resistentes para suportar as tensões impostas pelo usuário e são comumente classificadas pela região de uso, sendo essencialmente para membros superiores, membros inferiores e coluna vertebral, além disso existem também órteses cirúrgicas e para sequelas de queimaduras (EDELSTEIN; BRUCKNER, 2006; PEREIRA; VIEIRA, 2007).

Os dispositivos convencionais geralmente são pesados, desconfortáveis e não higiênicos. Esses pontos negativos aos usuários de órteses foram comuns durante décadas, porém a considerável evolução de tecnologias e materiais veio a permitir o desenvolvimento de dispositivos mais eficientes, os quais promovem de forma mais ampla e efetiva a inclusão social e melhoria de qualidade de vida dos usuários. Em lojas específicas, ainda são comercializadas órteses convencionais pré-fabricadas, porém essas estão cada vez mais perdendo espaço para as órteses customizadas sob medida (EDELSTEIN; BRUCKNER, 2006; POUNTNET, 2008).

O desenvolvimento de órteses de acordo com as especificidades do usuário é uma mudança de paradigma importante, pois possibilita atender as demandas individuais relacionadas à funcionalidade e conforto, minimizando as chances de insatisfações e problemas que muitas vezes causam abandono do dispositivo assistivo, prejudicando o tratamento. Em relação à esse tema, existe destaque especial à evolução da manufatura aditiva como forte aliada da tecnologia assistiva, pois uma das grandes vantagens do uso da impressão 3D para fabricação de dispositivos assistivos é a possibilidade de participação efetiva do usuário durante o processo, permitindo o desenvolvimento de uma órtese customizada, eficiente e confortável, o que acarreta na minimização dos riscos de abandono e rejeição (BARBOSA; TEIXEIRA-SALMELA; CRUZ et al, 2016; CARVALHO, 2006).

A empresa espanhola XKelet é um exemplo de sucesso na utilização de manufatura aditiva para a fabricação de órteses. Essa empresa trabalha com o desenvolvimento de produtos personalizados que se adaptam ao corpo do paciente e que podem ser removidos para limpeza sempre que necessário. As órteses desenvolvidas, exemplificadas na Figura 28, proporcionam ao usuário liberdade e facilidade para prática de suas atividades cotidianas, representando uma mudança de paradigma para imobilização pós-traumática e terapêutica. Além disso, existe também um aplicativo de escaneamento 3D da empresa, o qual pode ser utilizado para obtenção da anatomia do membro que receberá a órtese (XKELET, 2020).

Figura 28 – Exemplo de órteses fabricadas pela empresa XKelet



Fonte: XKelet (2020).

3.2.3. Dispositivos para auxílio diário

A deficiência torna-se praticamente uma condição universal caso se viva tempo suficiente, pois a velhice pode trazer impedimentos e diminuição das capacidades funcionais para atividades cotidianas (DINIZ, 2013). Nesse sentido, destaca-se que o aumento da expectativa de vida é uma realidade das sociedades modernas (SEGALLA; DA SILVA; PEDROSO, 2008; VERAS, 2009, OMS, 2012). Somos cada vez mais beneficiados pelo desenvolvimento tecnológico de recursos que favorecem, agilizam e ampliam nossas atividades cotidianas. Dentre os avanços, existe a evolução da tecnologia assistiva, que visa resolver ou reduzir limitações funcionais de pessoas com deficiência. Nessa área, a categoria de dispositivos para auxílio diário compreende produtos para tarefas cotidianas como: comer, cozinhar, vestir, escrever, tomar banho, executar necessidades pessoais, dentre outras. Tais produtos ajudam a ampliar habilidades funcionais, promovendo maior independência, qualidade de vida e inclusão social, através da consolidação de suas capacidades individuais de pessoas com deficiência (BERSCH, 2017).

Nesse contexto, tem-se a customização, possibilitada pela manufatura aditiva, como aspecto fundamental para mudanças de paradigmas nos conceitos de desenvolvimento de dispositivos assistivos relacionados às atividades cotidianas (ROCHA; LUIZ; ZULIAN, 2003; SANTOS; SILVEIRA, 2020). Exemplo disso é o protótipo funcional, desenvolvido em conjunto pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) e a Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), de uma colher para pessoas com dificuldades motoras decorrentes de limitações ocasionadas por doenças como, por exemplo, o Parkinson (SILVEIRA, 2017).

Figura 29 – Exemplo de colher para auxílio na alimentação fabricada por manufatura aditiva



Fonte: Silveira (2017).

3.2.4. Contexto social

A tecnologia assistiva é definida por sua finalidade independente do campo temático, isto é, por estar destinada a promover a funcionalidade, autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social das pessoas com deficiência. Ao examinar essa definição percebe-se uma diferença substancial em relação a outros tipos de tecnologia que são definidas conforme especificidades temáticas ou setoriais, como por exemplo tecnologia digital, mecânica, eletrônica, dentre outras (GARCIA; GALVÃO FILHO, 2012; GARCIA, 2014).

Dessa forma, a tecnologia assistiva diferencia-se das demais por conta de sua finalidade explícita de aumentar a qualidade de vida e inclusão social das pessoas com deficiência. A existência dessa forte dimensão social implica na adoção de uma matriz epistemológica e metodológica peculiar, que possui: como ponto de partida, os problemas, necessidades e limitações das pessoas com deficiência; como caminho, a aplicação de conhecimentos e metodologias de diversas áreas; como modo de operação, o foco no usuário; como resultado buscado, a inclusão social e melhoria da qualidade de vida dos usuários (GARCIA; GALVÃO FILHO, 2012; GARCIA, 2014). Essa matriz epistemológica explicitada exige uma conexão entre relevância científica, relevância social e aplicação prática. Nesse sentido, é preciso promover a conscientização dos profissionais envolvidos em relação à realidade e contexto do público atendido pela tecnologia assistiva, para existir responsabilidade social, cidadania e empatia (BONOTTO; SENA, 2016).

Problemas sociais são mais intensos em países subdesenvolvidos, porém também existem em países desenvolvidos. São questões que fazem parte da realidade e, portanto, devem ser consideradas para o desenvolvimento de produtos que atendam às necessidades de pessoas menos favorecidas culturalmente, socialmente ou economicamente. Nesse contexto, a combinação de viabilidade econômica e benefício social é um desafio que exige sinergia entre profissionais de diversas áreas para ultrapassar barreiras através da troca de conhecimentos, além de ser fundamental a promoção da participação do usuário para reconhecimento de suas demandas (ARRUDA et al., 2017; BONOTTO; SENA, 2016; PAZMINO, 2007).

A partir do momento em que o desenvolvimento de um produto passa a considerar as necessidades particulares e específica dos usuários, esse deixa de ser específico para a produção em massa e passa através da customização a ter objetivo de promover melhoria na qualidade de vida do indivíduo. Isso pode ter impacto social positivo, porque valoriza a preocupação, estudo e consideração, das limitações do usuário e de seu contexto social (LÖBACH, 2001).

De acordo com o Censo do IBGE, no ano 2010, aproximadamente 24% da população brasileira apresentava alguma deficiência, com acréscimo significativo da incidência de acordo com o aumento da faixa etária. Além disso, o Censo trazia a informação de que o Nordeste era a segunda maior região quanto ao número de pessoas com deficiência no Brasil. Em contrapartida à isso, estava a realidade retratada pela Secretaria de Ciência e Tecnologia para a Inclusão Social, em parceria com o Instituto de Tecnologia Social, de que 77% dos projetos desenvolvidos na áreas de tecnologia assistiva entre os anos de 2005 e 2008 estavam localizados nos estados do Rio Grande do Sul, São Paulo e Rio de Janeiro (IBGE, 2010; RODRIGUES; ALVES, 2013).

Nesse cenário, observa-se que apesar de constar na legislação brasileira o direito do cidadão com deficiência de ter acesso aos recursos de tecnologia assistiva de que necessita, o Brasil ainda está no início de uma jornada para o reconhecimento e estruturação dessa área. Mesmo diante da grande demanda reprimida, ainda é embrionário o estágio de incentivos à pesquisa e à produção nacional de recursos (BERSCH, 2017). Dessa maneira, é notório o déficit em tecnologia assistiva existente no Brasil. Esse é um grave problema social, diante do qual destaca-se positivamente o avanço no uso de impressão 3D para fabricação de dispositivos assistivos customizados e com vantagens de redução do tempo e dos custos envolvidos (CABRAL et al, 2019).

3.2.5. Abandono

Apesar da crescente demanda por produtos de tecnologia assistiva, ainda existem muitos problemas relacionados à essa área, tais como: o insuficiente desenvolvimento da indústria desse setor; a segmentação e monopolização do mercado; a falta de redes de distribuição especializadas; serviços insuficientes associados aos produtos oferecidos (PLOS et al, 2012). Em termos mundiais, estima-se que cerca de 600 milhões de pessoas não possuem dispositivos assistivos adequados (DE COUVREUR; GOOSSENS, 2011). Além disso, as necessidades específicas dos usuários de tecnologias assistivas e as características socioculturais de seu contexto são em muitos casos mal avaliadas, levando ao uso de dispositivos que não atendem de maneira satisfatória o usuário devido à problemas de usabilidade e ergonomia (PLOS et al, 2012).

A usabilidade compreende o uso eficaz, eficiente e satisfatório de um produto, com foco no atendimento à diferentes funções, cenários de uso, e fluxos de trabalho (WEGGE; ZIMMERMANN, 2007). Embora isso seja só uma parte da experiência completa do usuário, bons indicadores de usabilidade geralmente expressam uma experiência geral positiva em relação ao produto (AGARWAL; MEYER, 2009). Já a ergonomia é aplicada para desenvolvimento de produtos de fácil utilização e adequação ao corpo humano, com objetivo de otimizar a qualidade das interações através do entendimento das diversas necessidades, características, capacidades, competências, limitações e exigências do usuário (REBELO, 2017). A ergonomia é uma questão elementar aos usuários, e geralmente envolve múltiplas e complexas necessidades que devem ser satisfeitas simultaneamente (ZIEFLE, 2005).

Na área de tecnologia assistiva, a preocupação com ergonomia e usabilidade ajuda a diminuir as taxas de abandono dos dispositivos ao reconhecer e considerar as limitações das pessoas com deficiência no processo de desenvolvimento do produto. Mas para fornecer atendimento seguro e de qualidade, é preciso que os recursos desenvolvidos sigam padrões operacionais, sejam úteis, e clinicamente eficazes. Por isso o processo de desenvolvimento de dispositivos assistivos deve considerar o ambiente, os padrões de trabalho e, principalmente, os requisitos funcionais e de estilo de vida dos usuários (MARTIN et al. 2008; ZIEFLE, 2005).

Conforme exposto, observa-se que as elevadas taxas de subutilização e abandono de dispositivos assistivos são questões relevantes, pois geram prejuízos individuais e coletivos. Em relação ao indivíduo, existe perda de habilidades funcionais, liberdade e autonomia. Na dimensão coletiva, ocorre o uso ineficiente e o desperdício de recursos por parte dos governos e de outras organizações provedoras (PHILLIPS; ZHAO, 1993). Nesse contexto, existem alguns fatores que reconhecidamente podem conduzir à subutilização ou até mesmo ao abandono de um dispositivo assistivo, dentre os quais destacam-se: dificuldade de uso; falta de treinamento; desempenho funcional insatisfatório; alterações de demandas; custos elevados de reparo; ajuste insuficiente; desconfortos e dificuldades de higienização (COSTA et al., 2015). Além disso, existem também outros aspectos psicológicos e psicossociais que podem levar ao abandono, como por exemplo a quebra de altas expectativas, exclusão social, experiências prévias negativas, problemas de autoestima, e outras possibilidades (RESNIK et al., 2012).

Nesse cenário, observa-se que no caso de dispositivos desenvolvidos e fabricadas por métodos tradicionais fatores como a falta de ajuste, desconforto e quesitos estéticos não estimulam o uso, ou seja, nota-se que existe uma ligação das causas de subutilização e abandono, com o projeto do dispositivo assistivo. Portanto, para diminuir as taxas de abandono deve-se aplicar metodologias centradas no usuário para considerar o seu contexto e suas necessidades, através da promoção de participação ativa desse no processo de desenvolvimento do produto (COSTA et al., 2015; PATERSON et al., 2015). Pois para desenvolver dispositivos assistivos eficientes, que não serão subutilizados ou abandonados, necessita-se de uma compreensão detalhada das demandas do usuário e do contexto de uso (HASSENZAHL, 2008). Algo que se inicia no entendimento teórico e prático do que é uma boa experiência do usuário, segue para a definição de indicadores e métodos de avaliação, e culmina na integração das respostas e sugestões dos usuários ao processo de desenvolvimento do produto, visando atendê-lo da melhor forma possível (ROTO; RANTAVUO; VÄÄNÄNEN-VAINIO-MATTILA, 2009).

3.2.6. Customização

A manufatura aditiva é considerada uma tecnologia disruptiva, protagonista e precursora de uma nova revolução industrial, visto as transformações que essa tecnologia está promovendo não apenas na indústria manufatureira, mas também em campos diversos como a área de saúde através da mudança de paradigmas na fabricação de dispositivos assistivos (LIPSON; KURMAN, 2013; GALLOWAY, 2013; FIREFLAY, 2014). Nesse contexto, ressalta-se que o desenvolvimento de produtos de tecnologia assistiva envolve a customização de acordo com os requisitos específicos de cada usuário, devido à complexidade e individualidade dos casos. Isso restringe o uso de modelos tradicionais de produção em massa, o que consequentemente pode dificultar o acesso por parte da população aos dispositivos. Porém, como solução a esse problema, o conceito de personalização em massa está sendo ampliado fortemente através do avanço tecnológico e diminuição de custos de impressão 3D (FLORIO, 2011).

No caso de dispositivos assistivos, a customização coloca o usuário no centro do problema com capacidade de potencializar sua individualidade ao oferecer condições para que o próprio interessado exponha suas demandas, necessidades, requisitos e preferências. A customização de tais objetos deve ser baseada na individualização e no conceito de que nenhuma solução é imutável, por isso é preciso atenção na relação entre a pessoas e o produto (COSTA, 2012). A participação do usuário no processo de desenvolvimento do dispositivo assistivo é fundamental para o atendimento efetivo de suas e necessidades específicas e também de suas preferências subjetivas. Seja em casos decorrentes de doenças crônicas, envelhecimento populacional, restrições temporárias ou permanentes, nota-se que o desenvolvimento de um dispositivo assistivo para uma pessoa com deficiência exige ciclos sistemáticos de interação e iteração, objetivando customizar a solução de acordo com o usuário final, e, assim, minimizar riscos de subutilização e abandono do dispositivo (ASLAKSEN et al, 1997; SANTOS; SILVEIRA, 2020).

Dante do cenário apresentado sobre a relevância da customização na área de tecnologia assistiva, observa-se o importante papel da utilização de manufatura aditiva como propulsora do desenvolvimento de produtos com foco no usuário.

Além disso, é valido ressaltar que ao aliar a tecnologia de manufatura aditiva à ferramentas de modelagem paramétrica, tem-se a possibilidade de estabelecer uma cadeia de produção baseada em modelos digitais que permitem alterações de parâmetros para geração de variações de um mesmo produto de maneira fácil, prática e rápida. Essa possibilidade surge pela criação através de softwares CAD de modelos digitais com padrões e dimensões vinculados em variáveis, o que torna possível a atualização automática após cada modificação realizada nos parâmetros. Diante disso, observa-se que o uso de modelagem paramétrica favorece a customização dos produtos conforme as especificidades de cada usuário, o que ressalta o potencial da aplicação dessas ferramentas em conjunto à manufatura aditiva no desenvolvimento e fabricação de dispositivos assistivos (DEMARCHI, 2017; FOGGIATO, 2007; TEDESCHI, 2014).

3.2.7. Materiais de impressão

Conforme mostrado na seção 3.2.1, a técnica de manufatura aditiva FFF é a mais difundida. Quanto aos materiais, os mais usados são os termoplásticos ABS e PLA, por apresentarem boa resistência mecânica e custo relativamente baixo (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2017; FERRARI et al., 2019; TURNER; STRONG; GOLD, 2014). Além desses dois principais polímeros, ABS e PLA, destaca-se a gradativa evolução na utilização de outros materiais na técnica de manufatura aditiva FFF, tais como o PETG e o TPU (3DFILA, 2020).

O ABS tem boas características para fabricação de componentes mecânicos, é flexível, resistente, e permite que as peças sejam lixadas, coladas e pintadas. Porém, recomenda-se a utilização de uma mesa aquecida devido à tendência de empenamento do material (SALINAS, 2014; HUNT et al., 2015). Em contrapartida, o PLA não tem tendência de empenar, logo não necessita de mesa aquecida. Além disso é um material que apresenta facilidade de impressão, qualidade visual e boa resistência (RASAL et al., 2010; SALINAS, 2014). No comparativo de propriedades mecânicas entre ABS e PLA, mostrado na Tabela 4, observa-se que o PLA apresenta melhor desempenho mecânico em relação à tração e flexão do que ABS.

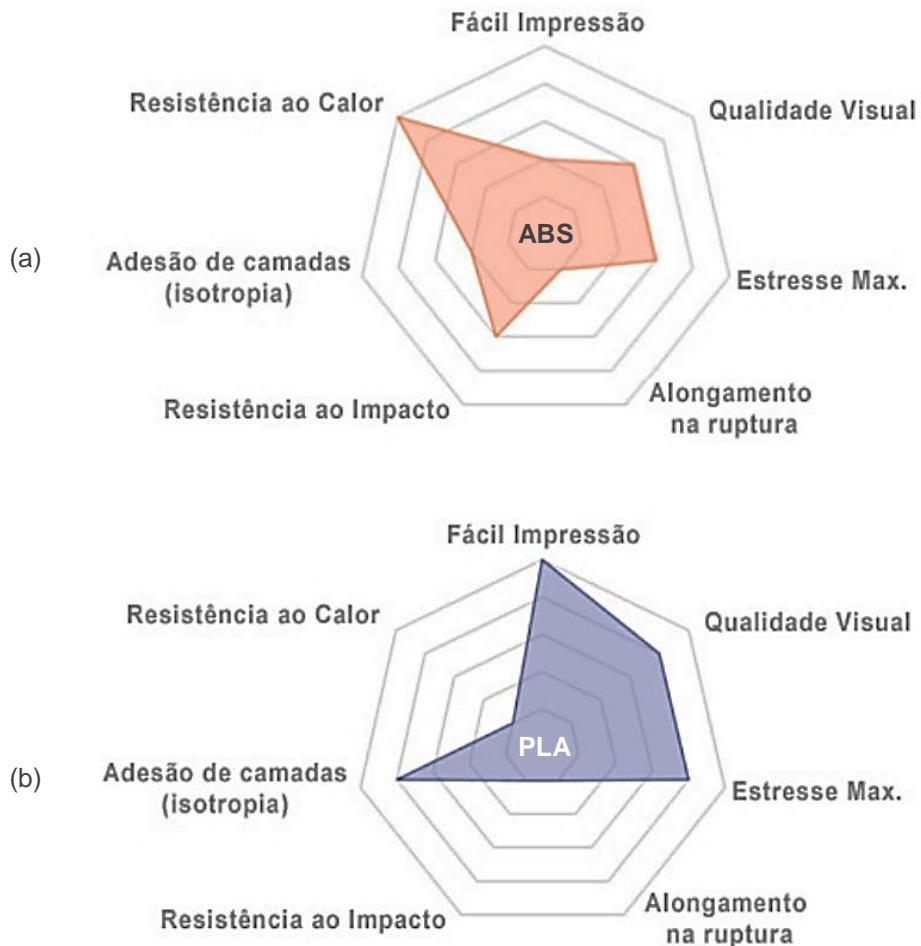
Tabela 4 – Comparativo de propriedades ABS e PLA.

Propriedade	ABS	PLA
Tensão máxima de tração	39MPa	49,5 MPa
Módulo de tração	1,6 GPa	2,3 GPa
Tensão máxima de flexão	70,5 MPa	103 MPa
Módulo de flexão	2,1 GPa	3,1 GPa

Fonte: adaptado de Ultimaker (2020).

Conjuntamente ao desempenho mecânico, em um mundo com recursos naturais limitados e grandes problemas ambientais, escolhas de alternativas mais sustentáveis são de extrema importância. Nesse contexto, vale ressaltar que os impactos ambientais causados por um produto estão diretamente relacionados à todas as fases do ciclo de vida, desde a obtenção da matéria-prima até o descarte. (BERKHOUT; SMITH, 1999; LJUNGBERG, 2007). Diante disso, destaca-se que o PLA é biodegradável e biocompatível, sua obtenção é pela fermentação feita por bactérias em vegetais ricos em amido, ou seja, o PLA é obtido através de fontes renováveis. Além disso, os produtos da degradação do PLA são atóxicos (RÓZ; GIESSE, 2003; RASAL et al., 2010). Por outro lado, o ABS é termoplástico derivado do petróleo e libera monômeros tóxicos durante o processo de impressão (SALINAS, 2014; HUNT et al., 2015). O aspecto da toxicidade é muito relevante para aplicação de manufatura aditiva dentro de ambientes de saúde, portanto nesses casos opta-se diretamente pela utilização do PLA devido a toxicidade do processo com ABS (HUNT et al., 2015). A Figura 30 apresenta uma comparação entre as características do ABS e do PLA.

Figura 30 – Comparativo entre ABS (a) e PLA (b).



Fonte: 3DApplications (2020).

4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE CORPOS DE PROVA

4.1. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

4.1.1. Equipamento, softwares e material de impressão

Na área de tecnologia assistiva, observa-se que na grande maioria das vezes opta-se pela técnica de manufatura aditiva FFF devido à possibilidade de fabricação de peças resistentes com custo relativamente baixo (FERRARI et al., 2019). Os corpos de prova, da análise detalhada nesta seção, foram fabricados em uma 3DClonerDH do Laboratório de Impressão 3D (LAB3D) do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos. Durante o processo de impressão a temperatura e umidade do ambiente foram mantidas em torno de 22°C e 50%, respectivamente (QUIRINO, 2019). O equipamento, mostrado na Figura 31, tem área útil de impressão de 320x210x400mm e trabalha com o processo aditivo de extrusão de técnica FFF (3DCLONER, 2018).

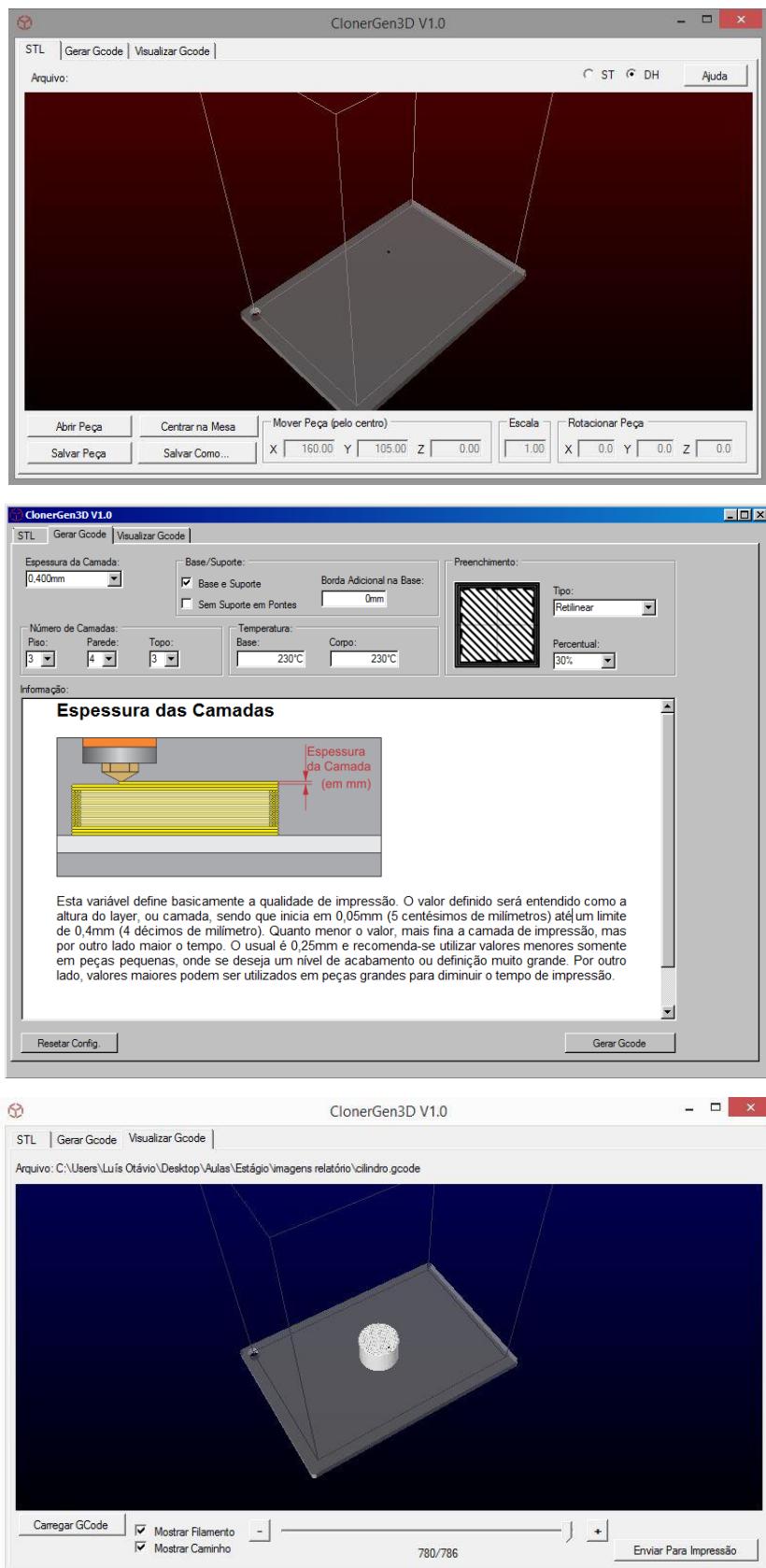
Figura 31 – 3D Cloner DH.



Fonte: 3DCloner (2018).

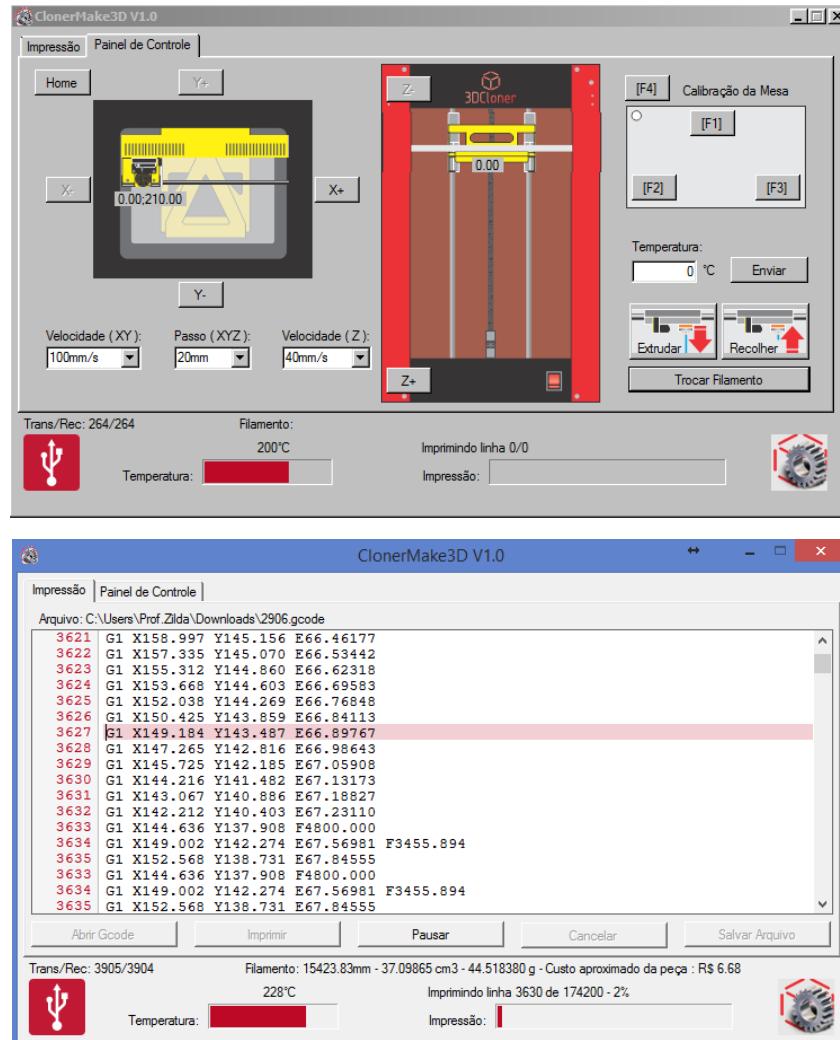
A impressora 3DClonerDH possui um software de fatiamento próprio, o ClonerGen3D. O primeiro passo no software é o posicionamento da peça, salva em formato STL, na mesa de impressão, em sequência define-se os parâmetros de impressão e gera-se o código g. Esses passos são expostos na Figura 32, e após a conclusão dessas etapas abre-se o software de controle e interação com a impressora, o ClonerMake3D, exposto na Figura 33.

Figura 32 – Ambiente do ClonerGen3D durante: posicionamento da peça na bandeja, seleção dos parâmetros e visualização do código g.



Fonte: Software ClonerGen3D.

Figura 33 – Ambiente do ClonerMake3D de painel de controle para interação com a máquina, e ambiente durante o processo de impressão.



Fonte: Software ClonerMake3D.

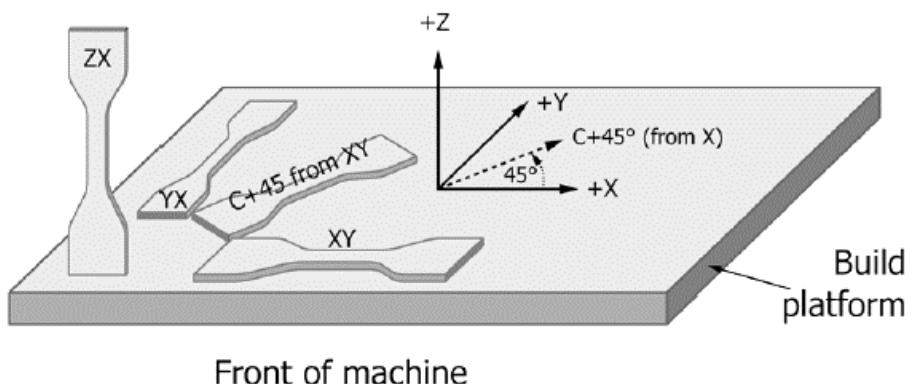
O material escolhido para o estudo foi o PLA. Pois, conforme as informações apresentadas na seção 3.2.7, o uso do PLA na técnica FFF apresenta atualmente quatro vantagens principais em relação ao ABS: não emite de gases nocivos, o que possibilita utilizar impressoras dentro de ambientes de saúde; oferece uma gama mais ampla de cores; não necessita de uso de mesa aquecida para impressão; tem melhor desempenho mecânico quanto à tração e flexão.

4.1.2. Definição dos fatores, níveis e respostas

O planejamento experimental ocorreu de forma que se pudesse estabelecer uma correlação entre os parâmetros de processo e as características mecânicas de corpos de prova fabricados através de manufatura aditiva. As características avaliadas foram: resistência à tração e módulo de tração; resistência à flexão e módulo de flexão, tempo de impressão e erros dimensionais. Além disso, foram realizadas algumas análises preliminares de microscopia eletrônica de varredura para avaliar a estrutura morfológica dos corpos de prova (QUIRINO, 2019).

A norma ASTM F2971-13 define as diretrizes para ensaios de corpos de provas gerados por manufatura aditiva, com base nessa tem-se as nomenclaturas de orientação de impressão apresentadas na Figura 34. Para o presente estudo, o parâmetro nomeado direção de impressão teve atribuições de acordo com seu eixo de orientação, sendo atribuído XY à orientação mista C+45º (QUIRINO, 2019).

Figura 34 – Orientação de construção.



Fonte: ASTM D790-17 (2017).

Para a primeira rodada experimental, foram variados cinco parâmetros de impressão seguindo um modelo de planejamento fatorial completo, com os níveis e terminologias expostos na Tabela 5. A montagem da matriz de planejamento dos experimentos, em anexo, foi feita a partir do cálculo da quantidade de experiências necessárias. Considerando que existem 4 fatores com 2 níveis e um fator com 3 níveis, e utilizando a equação (1) da seção 2.3.1, conclui-se a necessidade de um total de 48 corpos de prova de tração e 48 de flexão (QUIRINO, 2019).

Tabela 5 – Parâmetros variáveis na primeira rodada experimental.

Parâmetros	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Espessura de camada (mm)	0,125	0,300	-
Estratégia de preenchimento	Retilínea	Favo	-
Número de paredes	2	3	-
Cor	Virgem	Azul	-
Direção	X	Y	XY

Fonte: adaptado de Quirino (2019).

Segundo Santana (2015) peças com espessura de camada de 0,250mm e 0,300mm apresentam melhor resistência a tração. No LAB3D as impressões geralmente são realizadas com 0,250mm de espessura, portanto os dois níveis escolhido para esse parâmetro foram as opções inferiores e superiores para efeito de comparação. Entretanto o software 3DClonerGen, próprio da impressora para geração do código g, oferece possibilidades limitadas de espessuras de camada, de modo que de acordo a disponibilidade de opções definiu-se como nível inferior 0,125mm e como nível superior 0,300mm (QUIRINO, 2019).

As estratégias de preenchimento analisadas foram retilínea e favo, por serem as mais comumente empregadas. O número de paredes foi variado entre 2 e 3. Em relação a cor do filamento, utilizou-se virgem como referência e azul pelo interesse de estudar a influência da pigmentação nas propriedades do material. E, seguindo a nomenclatura exposta anteriormente na Figura 34, as direções de impressão analisadas foram: X, Y, e XY. A direção vertical Z não foi analisada, pois é reconhecidamente a menos resistente devido as propriedades anisotrópicas do processo de impressão, conforme exposto na seção 2.1.3.3 (QUIRINO, 2019).

A fabricante da 3DClonerDH recomenda uma temperatura de extrusão de 220°C a 230°C para impressão utilizando PLA. Agregando à essa recomendação as experiências acumuladas do laboratório com a máquina, escolheu-se trabalhar com uma temperatura de 230°C. Durante a fabricação dos corpos de prova a temperatura e umidade do ambiente foram mantidas em torno de 22°C e 50%. Os demais parâmetros foram fixados conforme consta na Tabela 6 (QUIRINO, 2019).

Tabela 6 – Parâmetros fixos na primeira rodada experimental.

Parâmetros fixos	Nível
Diâmetro do bico extrusor	0,4mm
Diâmetro do filamento	1,75mm
Material	PLA
Temp. de impressão	230°C
Taxa de extrusão	100mm/s
Base (camadas inferiores)	0
Topo (camadas superiores)	0
% de preenchimento	90%

Fonte: Quirino (2019).

Com base nos resultados da primeira rodada experimental, detalhados na seção 4.3, procedeu-se uma segunda rodada com redução da quantidade de parâmetros variáveis para somente dois fatores. Abordando agora exclusivamente a espessura de camada e a porcentagem de preenchimento, seguindo um modelo de planejamento fatorial completo, com os níveis e terminologia expostos a seguir na Tabela 7, e avaliando como resposta somente os dados de resistência e módulo dos ensaios de tração e flexão. A montagem da matriz de planejamento, em anexo, foi feita considerando um modelo de fatorial completo 2^2 com 4 réplicas. De modo que utilizando a equação (1) da seção 2.3.1, conclui-se a necessidade de um total de 32 corpos de prova de tração e 32 de flexão (QUIRINO, 2019).

Tabela 7 – Parâmetros variáveis na segunda rodada experimental

Índice	Parâmetros	Nível -	Nível +
A	Espessura de camada (mm)	0,250	0,300
B	Porcentagem de preenchimento	30%	60%

Fonte: Quirino (2019).

Como na primeira abordagem experimental observou-se maior resistência mecânica para espessura de camada de 0,300mm, com objetivo de aprimorar a análise através da diminuição do intervalo, foram escolhidos dessa vez os níveis de 0,250mm e 0,300mm. Já o tratamento da porcentagem de preenchimento como variável, nos níveis de 30% e 60%, objetivou expandir o estudo para mais um fator reconhecidamente influente nas propriedades mecânicas de peças impressas. Com os resultados experimentais da rodada anterior, fixaram-se os parâmetros antes variáveis nos níveis que apresentaram maior resistência (QUIRINO, 2019). Todos os parâmetros fixos e seus valores estão expostos na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Parâmetros fixos na segunda rodada experimental.

Parâmetros fixos	Nível
Diâmetro do bico extrusor	0,4mm
Diâmetro do filamento	1,75mm
Material	PLA
Cor	Azul
Temp. de impressão	230°C
Velocidade de extrusão	100mm/s
Base (camadas inferiores)	0
Topo (camadas superiores)	0
Número de paredes	2
Estratégia de preenchimento	Favo
Direção	X

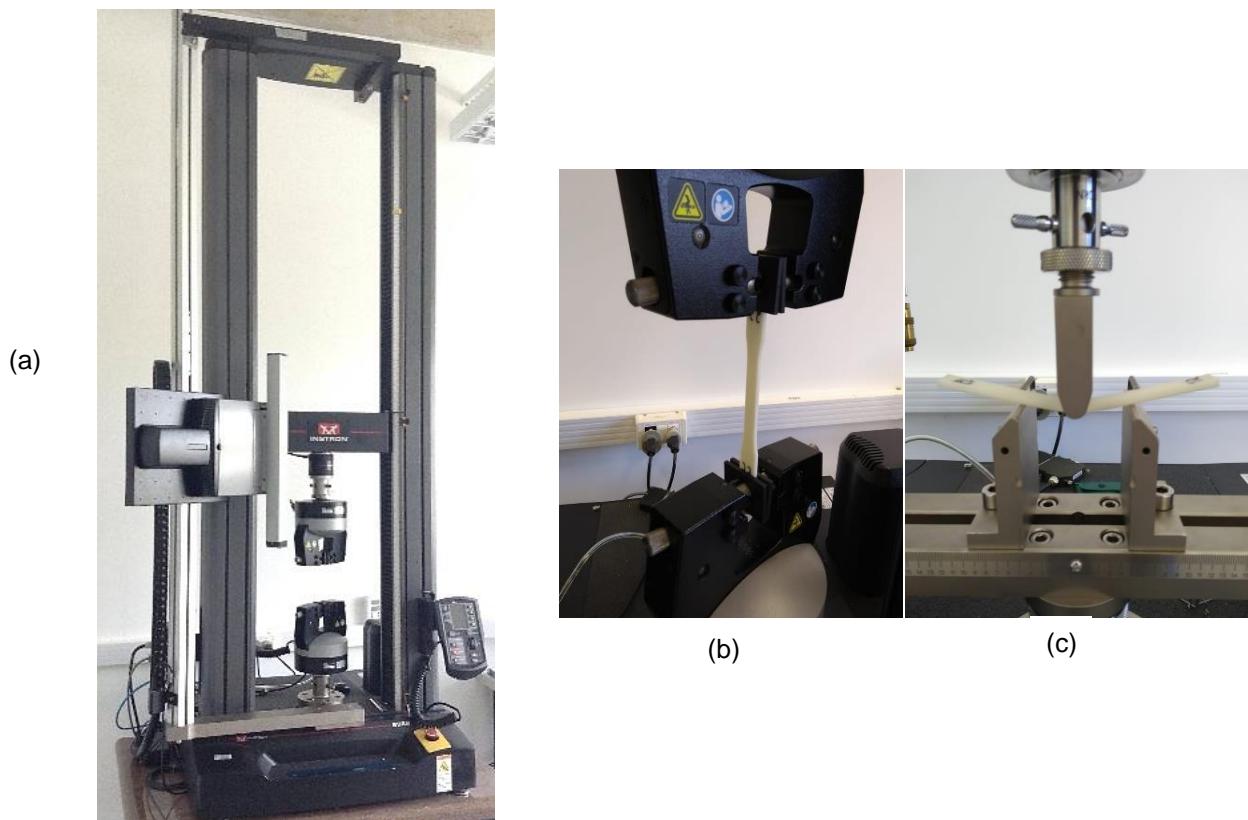
Fonte: Quirino (2019).

4.2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.2.1. Ensaios mecânicos de tração e flexão

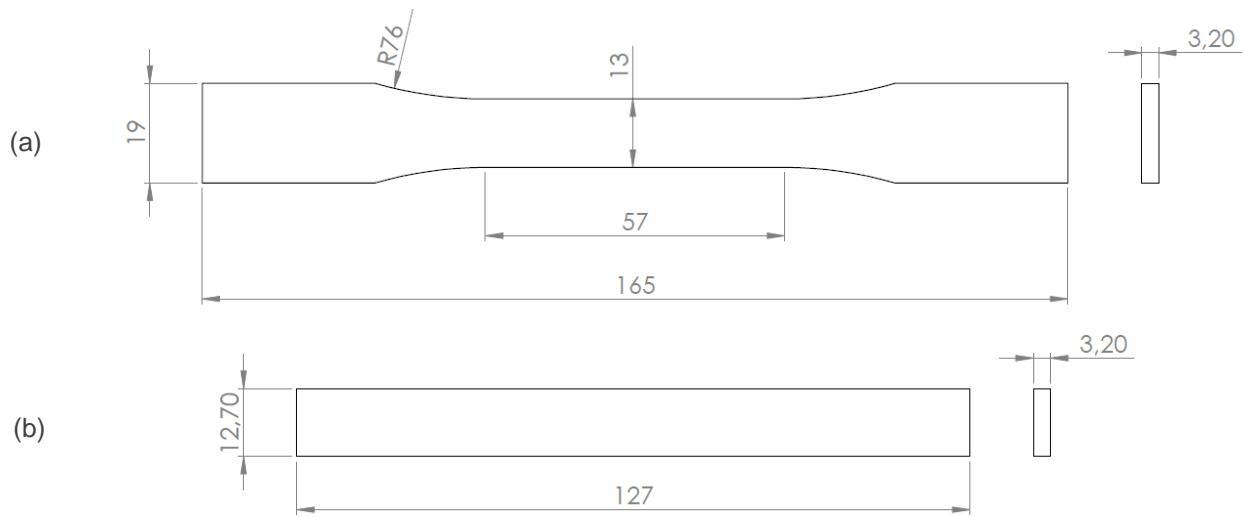
Foram realizados ensaios mecânicos de tração e flexão em um equipamento INSTRON 5969 do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos da USP, utilizando o software Instron Bluehill, e seguindo respectivamente as normas ASTM D638-14 e ASTM D790-17. Nos ensaios de tração a velocidade utilizada foi de 5mm/min, já para os ensaios de flexão usou-se velocidade de 3mm/min e *span* de 50mm. Imagens do equipamento e ensaios são apresentadas a seguir na Figura 35, enquanto que as dimensões dos corpos de prova impressos são expostas na Figura 36 em sequência (QUIRINO, 2019).

Figura 35 – Equipamento (a) de ensaio de tração (b) e flexão (b).



Fonte: Quirino (2019).

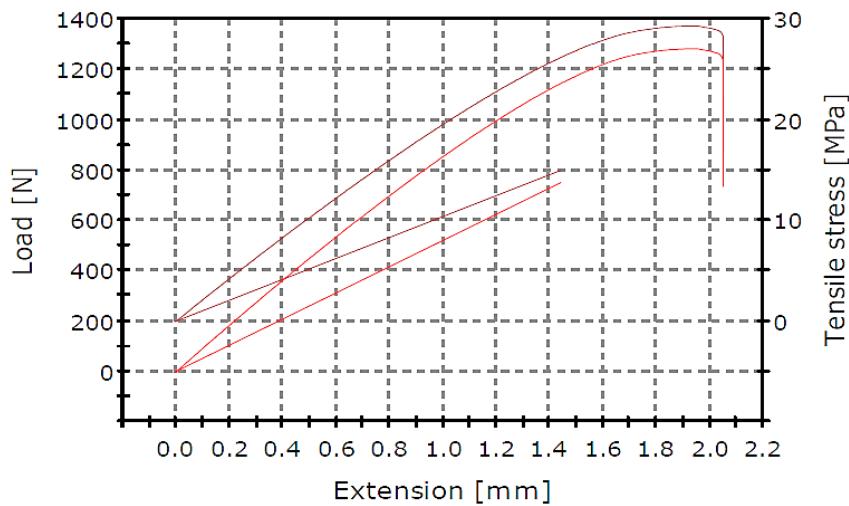
Figura 36 – Corpos de prova de tração (a) e flexão (b)



Fonte: ASTM D638-14 e ASTM D790-17

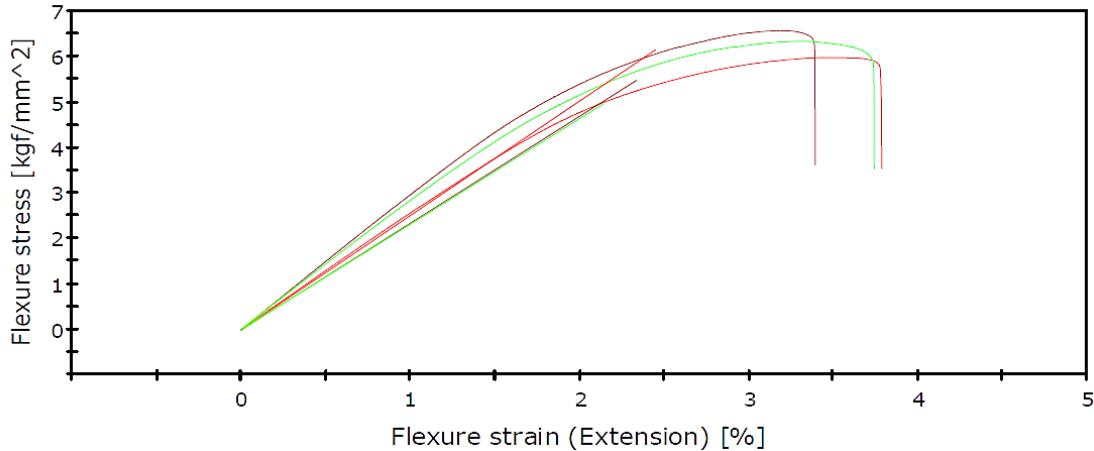
Os mais de cem gráficos obtidos nos ensaios, em geral, apresentam a mesma forma dos exemplos mostrados nas Figura 37 e Figura 38. Desse modo, durante a exposição dos resultados na seção 4.3, não há necessidade apresentá-los por serem todos muito similares em forma (QUIRINO, 2019).

Figura 37 – Exemplo de gráfico obtido no ensaio de tração



Fonte: software Instron Bluehill.

Figura 38 – Exemplo de gráfico obtido no ensaio de flexão



Fonte: software Instron Bluehill

4.2.2. Análise de erros dimensionais e tempo de impressão

Para análise dos erros dimensionais mediram-se os corpos de prova com um paquímetro Starrett MEB125 de resolução 0,05mm e exatidão $\pm 0,05\text{mm}$. Sendo o erro em Z referente à espessura do corpo de prova e os erros no plano XY referentes à largura, nomeados pelo eixo transversal à orientação de impressão. Em relação ao tempo gasto para impressão, é uma informação dada pelo software ao final do processo e visando generalizar a análise para além dos corpos de prova os tempos foram normalizados em torno do valor unitário (QUIRINO, 2019).

4.2.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura utiliza um feixe de elétrons de alta energia que varre a superfície da amostra, de modo que a partir da interação entre os elétrons e a amostra tem-se informações do material como: morfologia externa, composição química, estrutura cristalina e orientação estrutural. A maioria dos equipamentos utilizam como fonte de elétrons um filamento de tungstênio aquecido que acelera o feixe, e em seguida o focaliza sobre a amostra através de lentes eletromagnéticas. Essa técnica gera imagens com aumento entre 20 e 30000 vezes, e resolução espacial de 50 a 100nm (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

As microfotografias são importantes na avaliação dos corpos de prova para entendimento da estruturação das camadas depositadas durante o processo de impressão. Utilizou-se para análise microscópica da região de fratura o microscópio eletrônico de varredura LEO440, mostrado na Figura 39, da Central de Análises Químicas Instrumentais do Instituto de Química de São Carlos (CAQI-IQSC-USP). Devido ao custo elevado e a difícil preparação das amostras foram realizadas poucas análises, todavia suficientes para extração de informações úteis acerca dos parâmetros em estudo, conforme detalhado na seção 4.4.3 (QUIRINO, 2019).

Figura 39 – Microscópio Eletrônico de Varredura LEO440



Fonte: CAQI-IQSC-USP (2020).

4.2.4. Procedimentos estatísticos

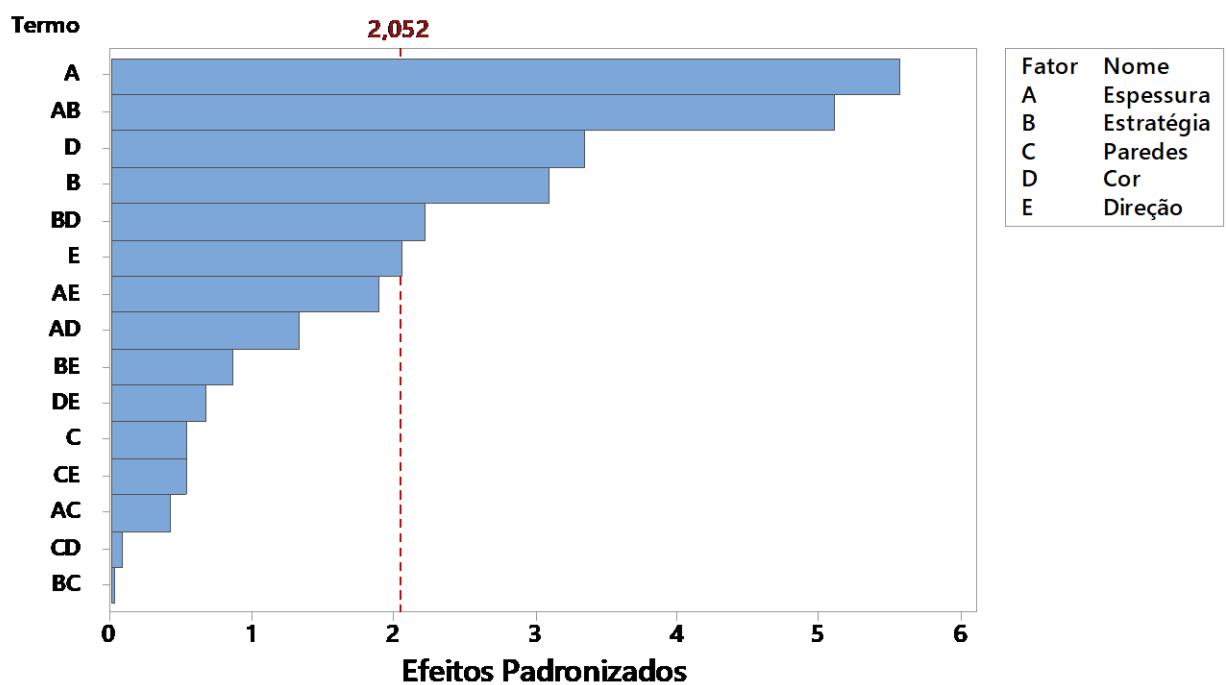
A partir dos resultados experimentais foram realizadas as análises estatísticas com base nos procedimentos do DOE. Os cálculos e gráficos foram feitos pelo software Minitab considerando um nível de significância α de 5%, ou seja, um nível de confiança de 95%. No Matlab fez-se também a validação dos modelos, iniciando com os testes de igualdade de variâncias, a partir dos quais foi possível constatar que em qualquer uma das situações existia sobreposição de intervalos de valores nos gráficos de intervalos de desvio padrão, garantindo, portanto, que as variâncias eram suficientemente semelhantes. Em seguida com a verificação dos gráficos de resíduos, comprovou-se que esses eram aleatórios e seguiam satisfatoriamente uma distribuição normal. Dessa maneira, conforme explorado na seção 2.3.4, com o teste de igualdade de variâncias e a análise dos resíduos, gráficos em anexo, assegura-se a validade dos modelos utilizados (QUIRINO, 2019).

4.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

4.3.1. Tensão máxima de tração

Referente à primeira rodada experimental, é possível observar pelo gráfico de Pareto da Figura 40 a magnitude relativa dos efeitos principais e interação entre fatores na tensão máxima de tração, e verificar quais satisfazem o nível de confiança de 95%, representado pela linha vermelha tracejada (QUIRINO, 2019).

Figura 40 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (tensão máxima de tração; $\alpha = 0,05$)

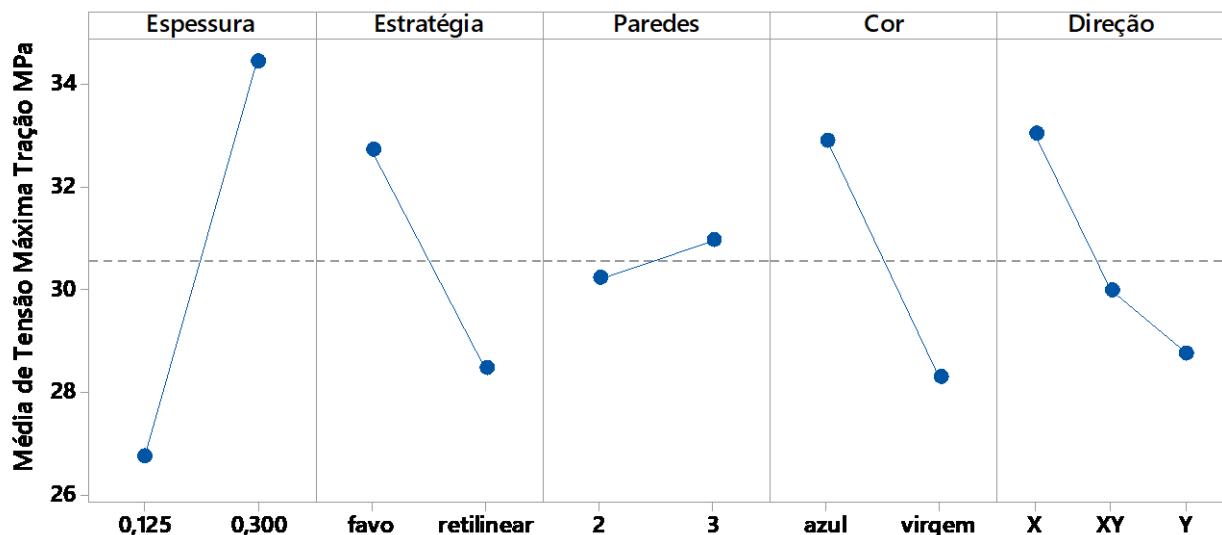


Fonte: Quirino (2019).

Encontram-se nas figuras a seguir deste parágrafo os gráficos dos efeitos principais e interações entre fatores para a tensão máxima de tração. Em relação aos efeitos principais estatisticamente significativos, observa-se que a resposta analisada é superior com o aumento da espessura de camada, estratégia de preenchimento favo em relação a retilinear, e cor azul em relação a virgem. Além disso, constata-se que a tensão máxima de tração é superior para corpos de prova impressos na direção X, mediano para XY e inferior para Y. Enquanto que o número de paredes variando de duas para três não apresentou um efeito estatisticamente significativo. Em relação às interações entre fatores estatisticamente significativas,

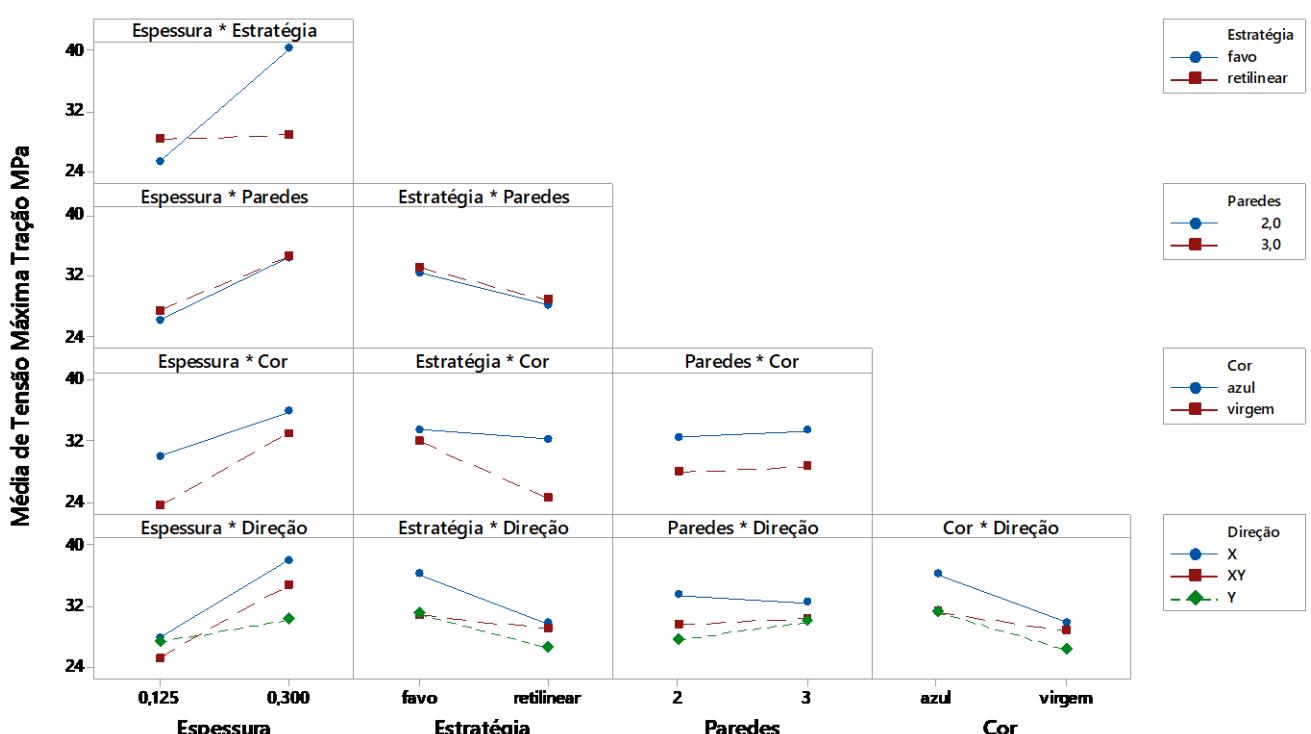
nota-se que para a tensão máxima de tração: o efeito do aumento da espessura de camada é mais expressivo com a estratégia favo e praticamente insignificante com retilinear; o efeito negativo da troca de estratégia de preenchimento de favo pra retilinear é mais expressivo na cor virgem e praticamente insignificante na cor azul (QUIRINO, 2019).

Figura 41 – Gráficos de efeitos principais na tensão máxima de tração



Fonte: Quirino (2019).

Figura 42 – Gráfico de interações na tensão máxima de tração



Fonte: Quirino (2019).

Referente à segunda rodada experimental, é possível observar pelo gráfico de Pareto da Figura 43 que somente a porcentagem de preenchimento apresentou influência estatisticamente significativa na tensão máxima de tração, ultrapassando a linha tracejada vermelha que representa o nível de confiança de 95%. Sendo a correlação positiva, conforme mostrado no gráfico na Figura 44 (QUIRINO, 2019).

Figura 43 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (tensão máxima de tração; $\alpha = 0,05$)

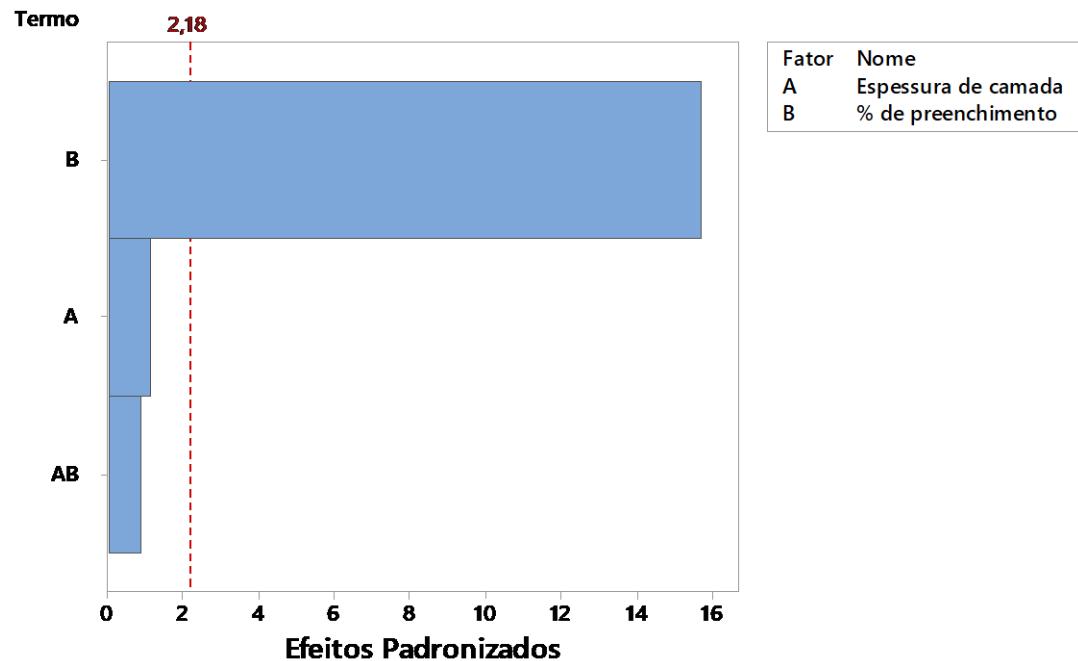
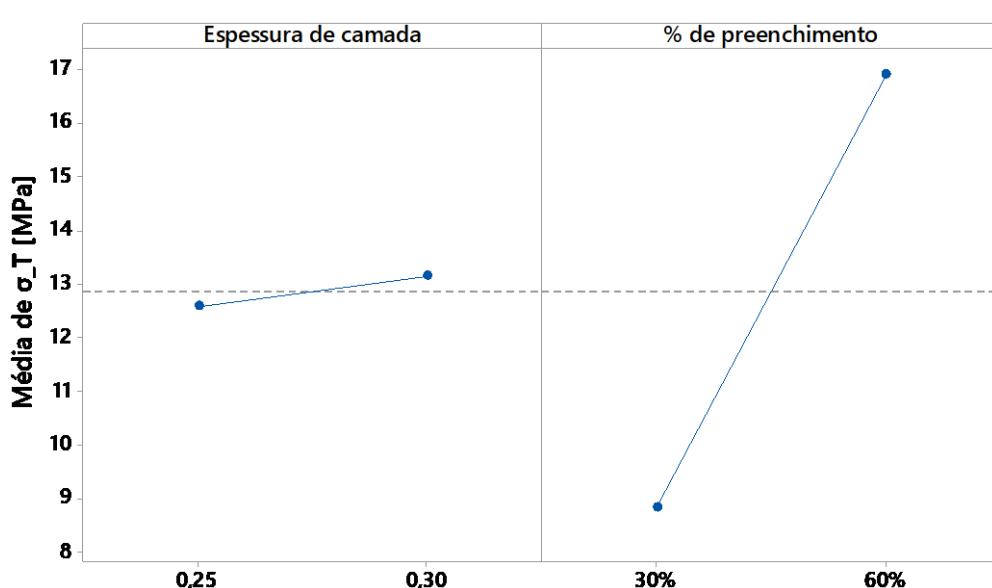


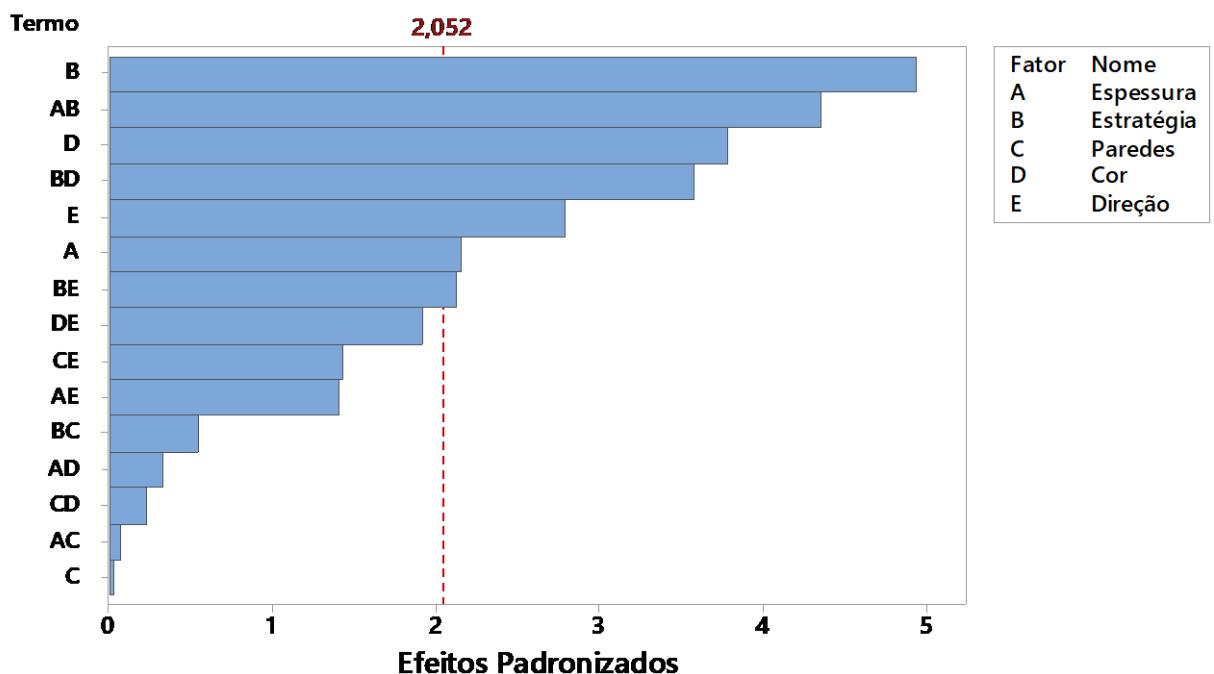
Figura 44 – Gráficos de efeitos principais na tensão máxima de tração



4.3.2. Módulo de elasticidade de tração

Referente à primeira rodada experimental, é possível observar pelo gráfico de Pareto da Figura 45 a magnitude relativa dos efeitos principais e interação entre fatores no módulo de elasticidade de tração, e verificar quais satisfazem o nível de confiança de 95%, representado pela linha vermelha tracejada (QUIRINO, 2019).

Figura 45 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (módulo de elasticidade de tração; $\alpha = 0,05$)

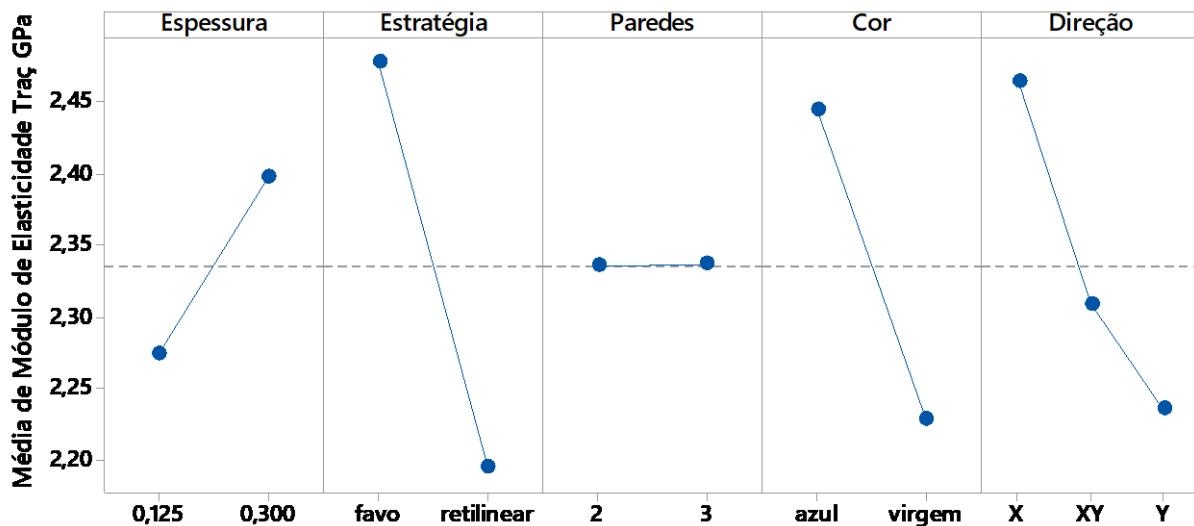


Fonte: Quirino (2019).

Encontram-se nas figuras a seguir deste parágrafo os gráficos dos efeitos principais e interações entre fatores para o módulo de elasticidade de tração. Em relação aos efeitos principais estatisticamente significativos, observa-se que a resposta analisada é superior com o aumento da espessura de camada, estratégia de preenchimento favo em relação a retilínea, e cor azul em relação a virgem. Além disso, constata-se que o módulo de elasticidade de tração é superior para corpos de prova impressos na direção X, mediano para XY e inferior para Y. Enquanto que o número de paredes variando de duas para três não apresentou um efeito estatisticamente significativo na resposta. Em relação às interações entre fatores estatisticamente significativas, observa-se que para o módulo de elasticidade de tração: o efeito do aumento da espessura de camada é mais expressivo com a estratégia favo, e praticamente insignificante com retilínea; o efeito negativo da

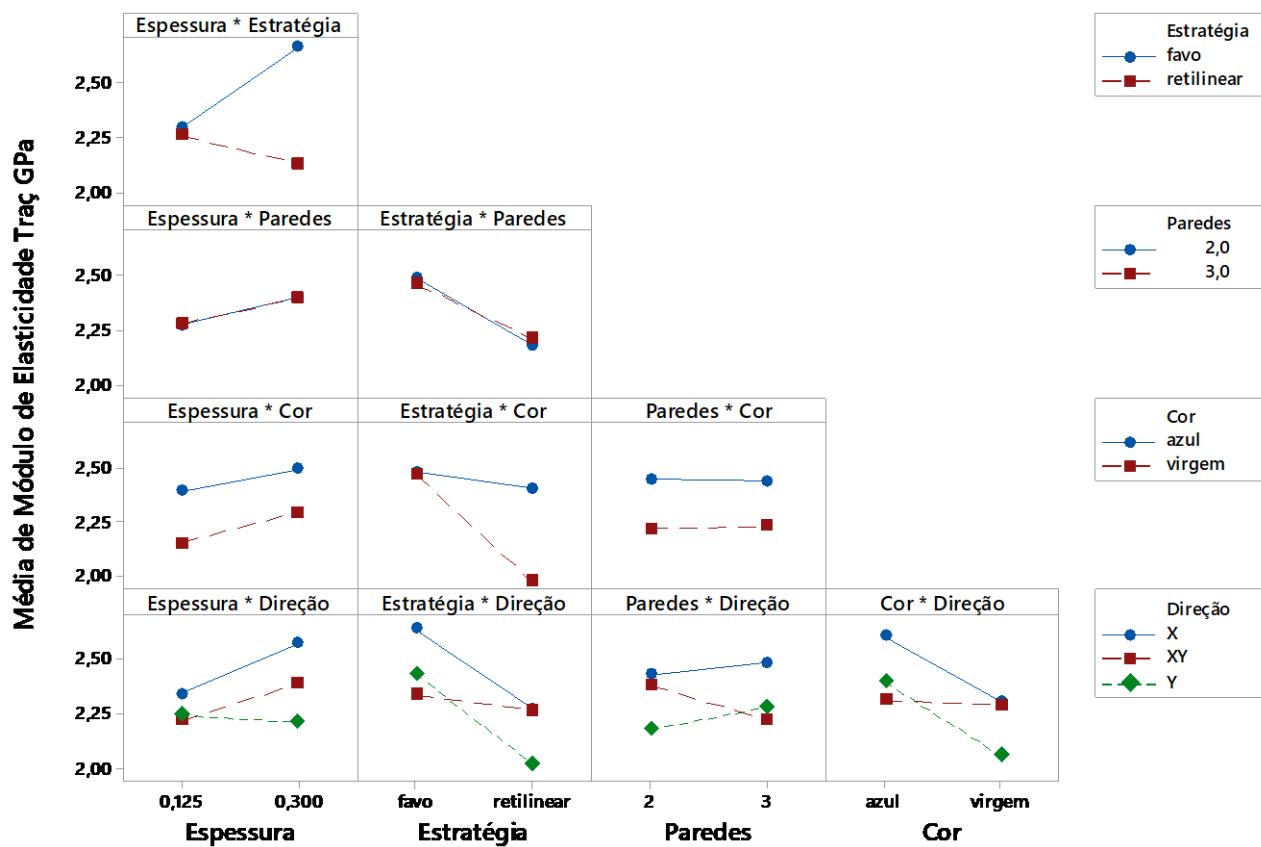
mudança de estratégia de preenchimento de favo pra retilinear é mais expressivo com a cor virgem e praticamente insignificante com azul; com estratégia de preenchimento retilinear a resposta para as direções X e Y são equivalentes, mas com estratégia favo existem diferenças conforme a direção (QUIRINO, 2019).

Figura 46 – Gráficos de efeitos principais no módulo de elasticidade de tração



Fonte: Quirino (2019).

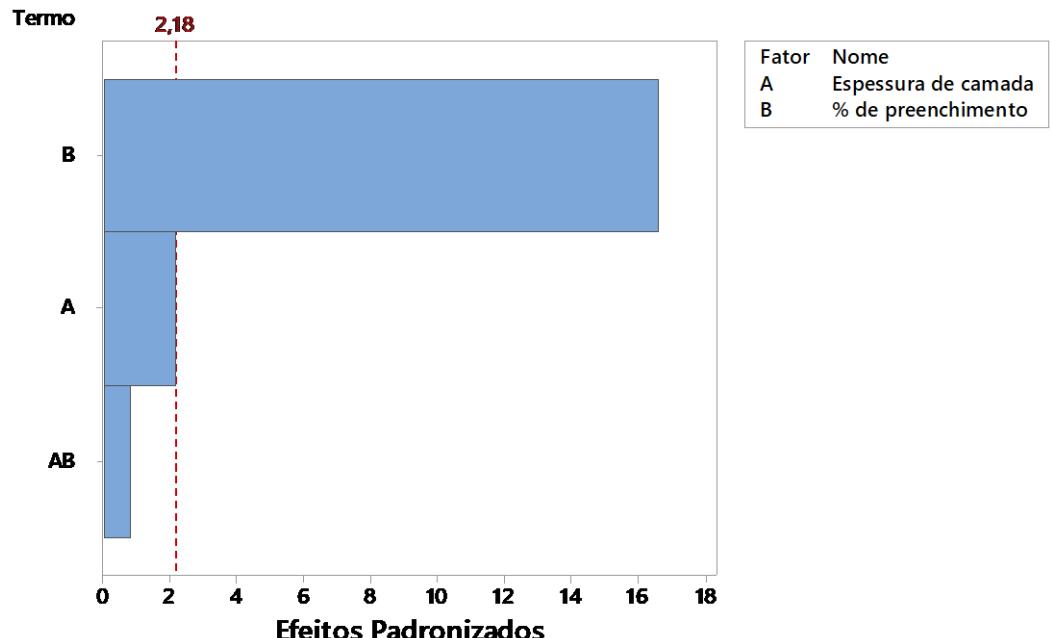
Figura 47 – Gráfico de interações para módulo de elasticidade de tração



Fonte: Quirino (2019).

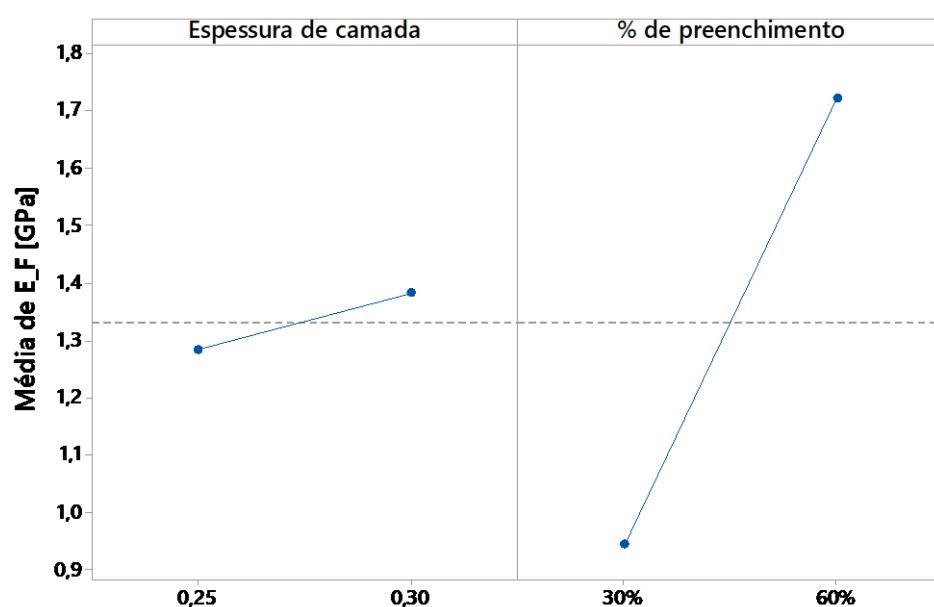
Referente à segunda rodada experimental, observa-se pelo gráfico de Pareto da Figura 48 que somente a porcentagem de preenchimento apresentou influência estatisticamente significativa no módulo de elasticidade de tração, ultrapassando a linha tracejada vermelha de referência de nível de confiança de 95%. Sendo a correlação positiva, conforme mostrado no gráfico na Figura 49 (QUIRINO, 2019).

Figura 48 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados no módulo de elasticidade de tração ($\alpha = 0,05$)



Fonte: Quirino (2019).

Figura 49 – Gráficos de efeitos principais no módulo de elasticidade de tração

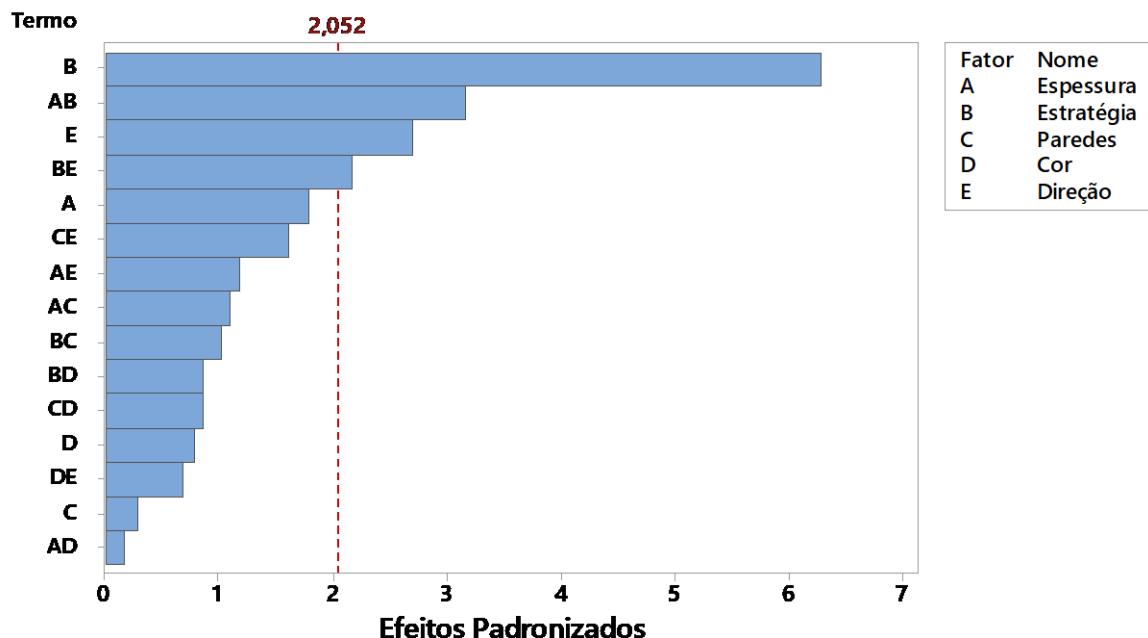


Fonte: Quirino (2019).

4.3.3. Tensão máxima de flexão

Referente à primeira rodada experimental, é possível observar pelo gráfico de Pareto da Figura 50 a magnitude relativa dos efeitos principais e interação entre fatores na tensão máxima de flexão, e verificar quais satisfazem o nível de confiança de 95%, representado pela linha vermelha tracejada (QUIRINO, 2019).

Figura 50 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (tensão máxima de flexão; $\alpha = 0,05$)

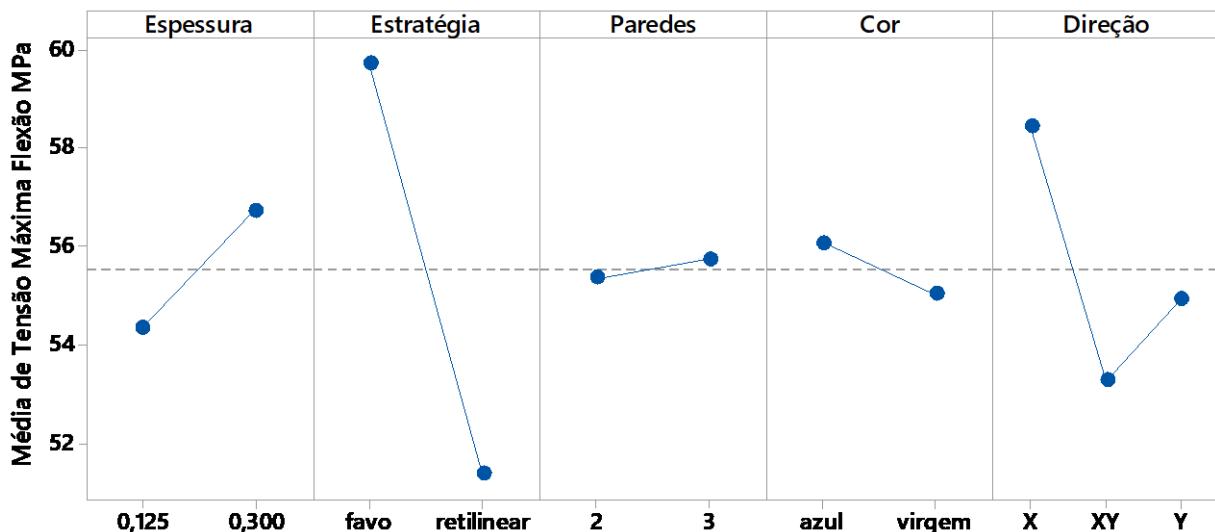


Fonte: Quirino (2019).

Encontram-se nas figuras a seguir deste parágrafo os gráficos dos efeitos principais e interações entre fatores para a tensão máxima de flexão. Em relação aos efeitos principais estatisticamente significativos, observa-se que a resposta analisada é superior com estratégia de preenchimento favo em relação a retilínea. Além disso, constata-se que a tensão máxima de flexão é superior para corpos de prova impressos na direção X, mediano para XY e inferior para Y. Enquanto isso, não apresentaram efeito estatisticamente significativo na resposta os parâmetros de espessura de camada, número de paredes e cor do filamento. Em relação às interações entre fatores estatisticamente significativas, observa-se que para a tensão máxima de flexão: o efeito do aumento da espessura de camada é mais expressivo com a estratégia favo, e praticamente insignificante com retilínea; com estratégia de preenchimento retilínea a resposta para as direções X e Y são

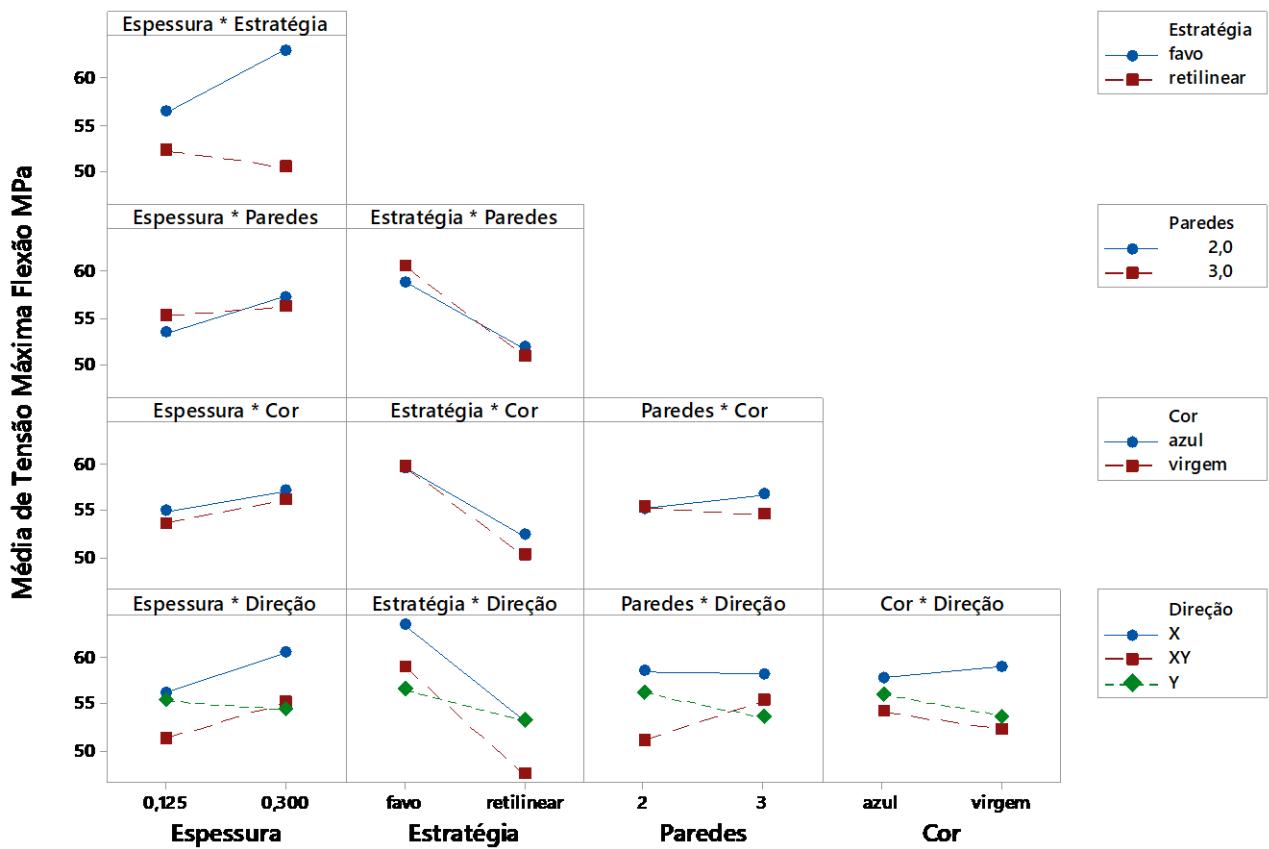
equivalentes, mas com estratégia favo existem diferenças conforme a direção de impressão (QUIRINO, 2019).

Figura 51 – Gráficos de efeitos principais na tensão máxima de flexão



Fonte: Quirino (2019).

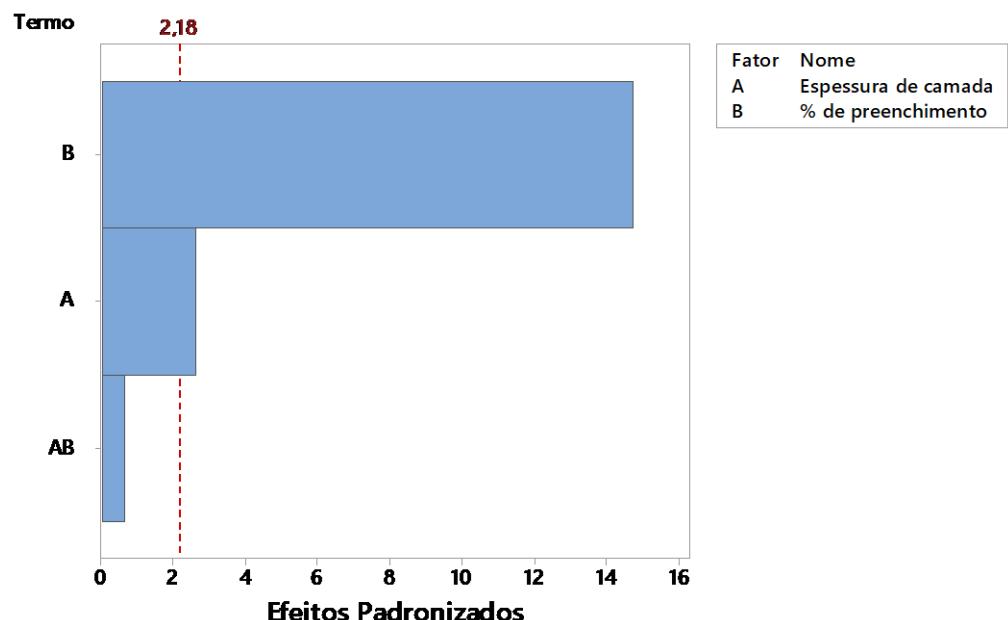
Figura 52 – Gráfico de interações para tensão máxima de flexão



Fonte: Quirino (2019).

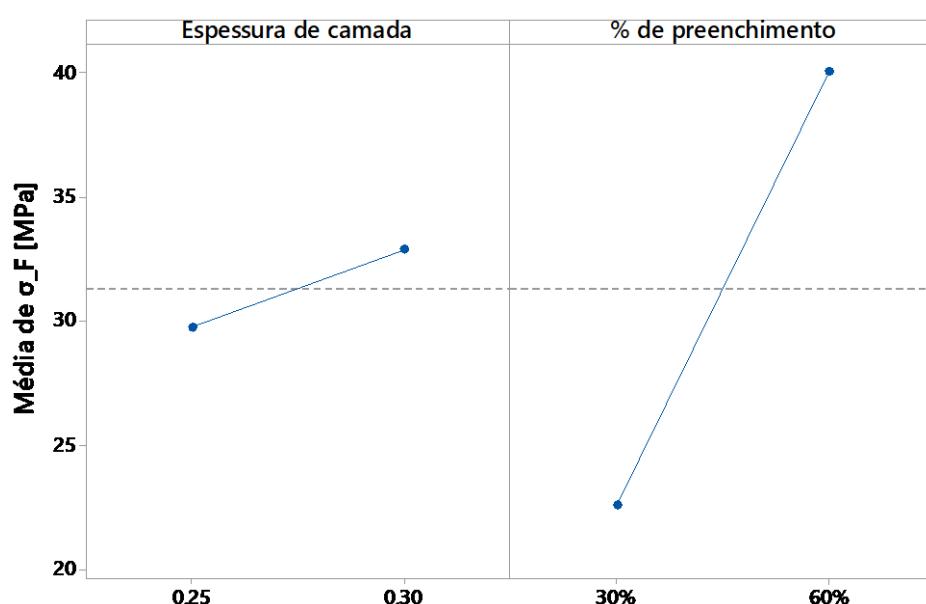
Referente à segunda rodada experimental, observa-se pelo gráfico de Pareto da Figura 53 que somente os efeitos principais, espessura de camada e porcentagem de preenchimento, têm influência estatisticamente significativa na tensão máxima de flexão, ultrapassando a linha tracejada vermelha de referência de nível de confiança de 95%. E conforme exposto graficamente na Figura 54, a correlação é positiva em ambos casos (QUIRINO, 2019).

Figura 53 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados na tensão máxima de flexão ($\alpha = 0,05$)



Fonte: Quirino (2019).

Figura 54 – Gráficos de efeitos principais na tensão máxima de flexão

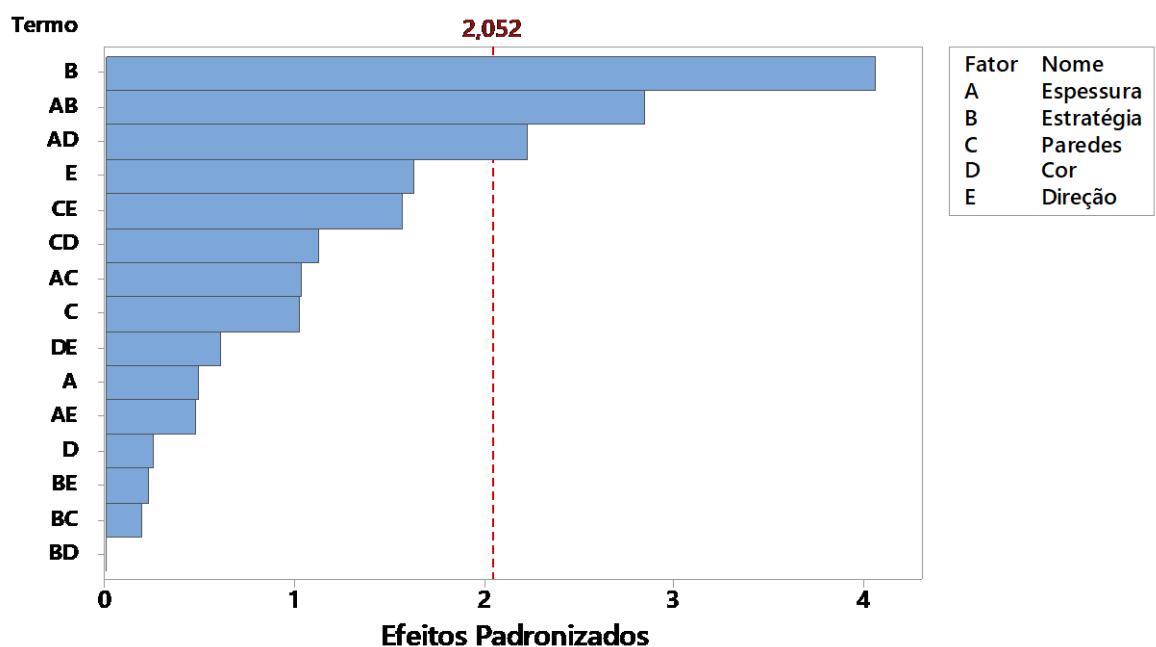


Fonte: Quirino (2019).

4.3.4. Módulo de elasticidade de flexão

Referente à primeira rodada experimental, é possível observar pelo gráfico de Pareto da Figura 55 a magnitude relativa dos efeitos principais e interação entre fatores no módulo de elasticidade de flexão e verificar quais satisfazem o nível de confiança de 95%, representado pela linha vermelha tracejada (QUIRINO, 2019).

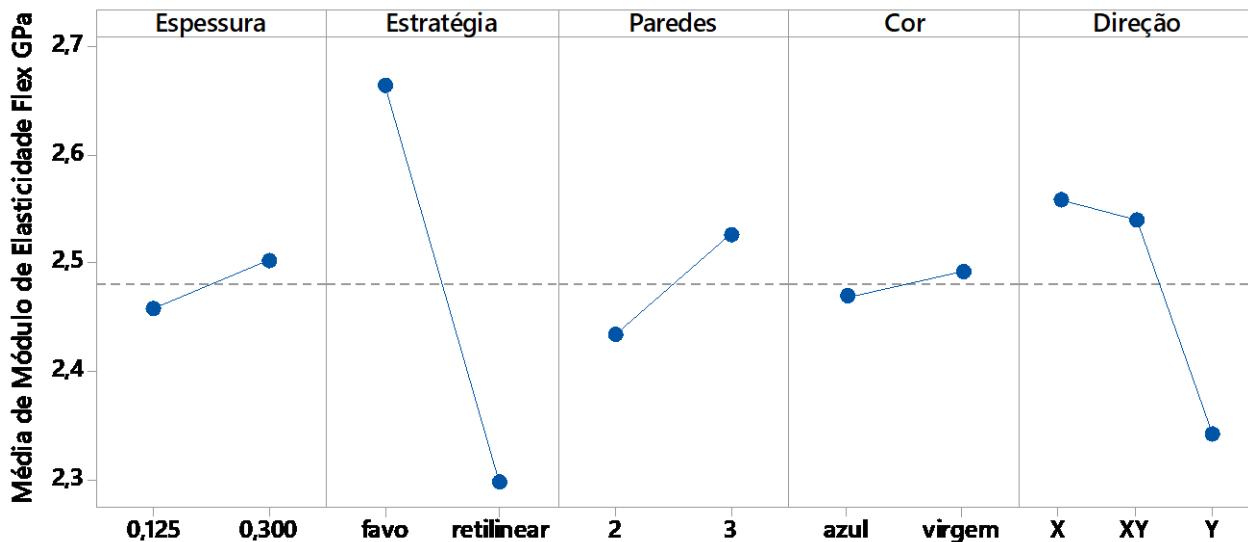
Figura 55 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (módulo de elasticidade de flexão; $\alpha = 0,05$)



Fonte: Quirino (2019).

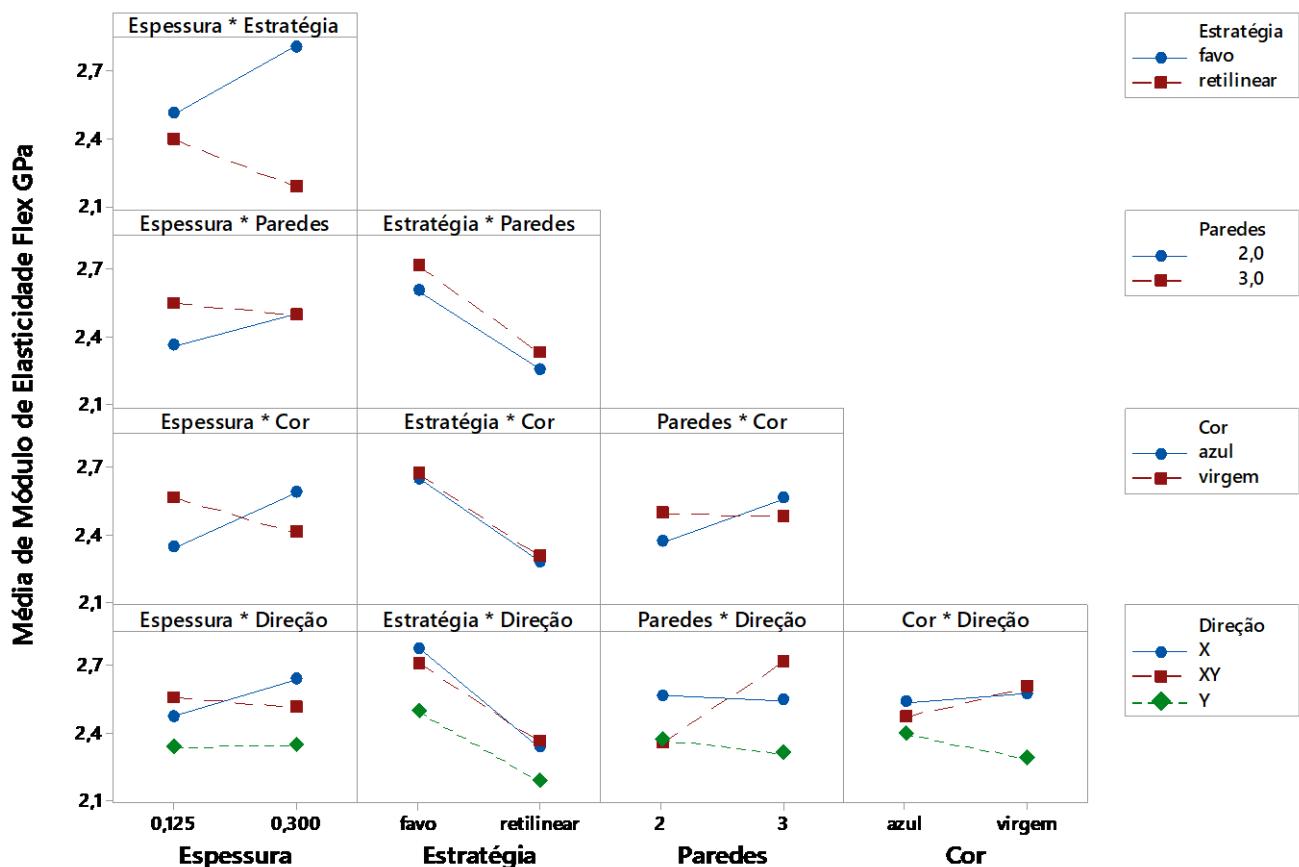
Encontram-se nas figuras a seguir deste parágrafo os gráficos dos efeitos principais e interações entre fatores para o módulo de elasticidade de flexão. Em relação aos efeitos principais estatisticamente significativos, observa-se que a resposta analisada é superior com a estratégia de preenchimento favo em relação a retilinear. Não se verificou influência direta estatisticamente significativa no módulo de elasticidade de flexão dois demais fatores: espessura de camada, número de paredes, cor e direção de impressão. Em relação às interações entre fatores estatisticamente significativas, observa-se que para o módulo de elasticidade de flexão: o efeito do aumento da espessura de camada na resposta é mais expressivo com a estratégia favo do que retilinear; na cor azul o aumento de espessura gera uma resposta superior, enquanto com virgem o efeito é contrário. (QUIRINO, 2019).

Figura 56 – Gráficos de efeitos principais para o módulo de elasticidade de flexão



Fonte: Quirino (2019).

Figura 57– Gráfico de interações para módulo de elasticidade de flexão



Fonte: Quirino (2019).

Referente à segunda rodada experimental, observa-se pelo gráfico de Pareto da Figura 58 que somente os efeitos principais, espessura de camada e porcentagem de preenchimento, têm influência estatisticamente significativa no módulo de elasticidade de flexão, ultrapassando a linha tracejada vermelha que representa o nível de confiança de referência de 95%. Sendo que conforme exposto graficamente na Figura 59, a correlação é positiva com ambos (QUIRINO, 2019).

Figura 58 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (módulo de elasticidade de flexão; $\alpha = 0,05$)

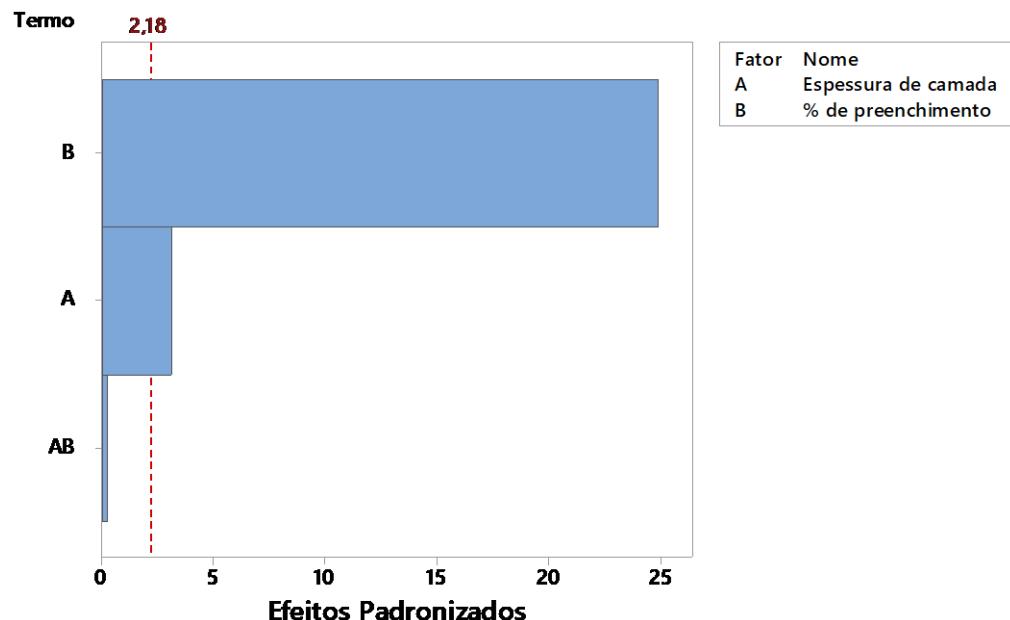
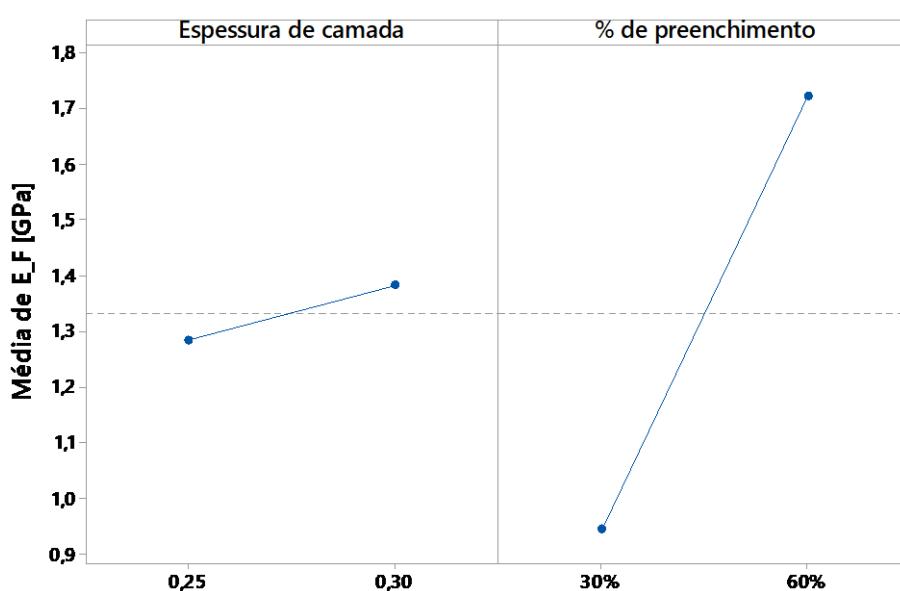


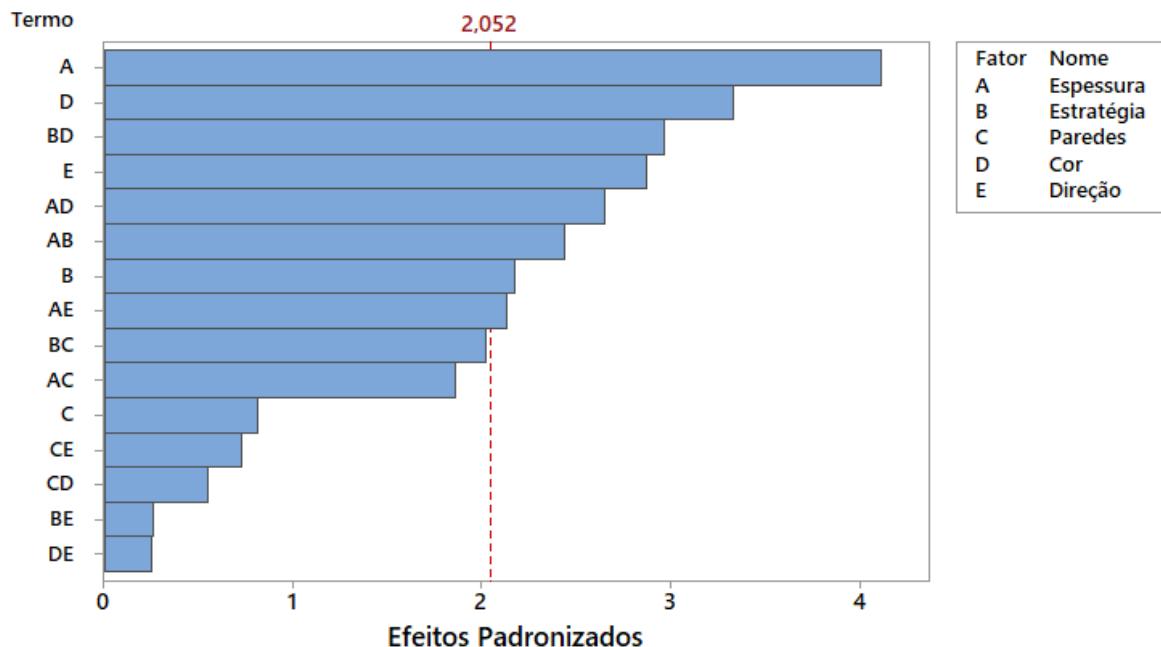
Figura 59 – Gráficos de efeitos principais no módulo de elasticidade de flexão



4.3.5. Erros dimensionais no eixo z

Referente à primeira rodada experimental, é possível observar pelo gráfico de Pareto da Figura 60 a magnitude relativa dos efeitos principais e interação entre fatores no erro dimensional no eixo z, e verificar quais satisfazem o nível de confiança de 95%, representado pela linha vermelha tracejada (QUIRINO, 2019).

Figura 60 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (erro em z; $\alpha = 0,05$)

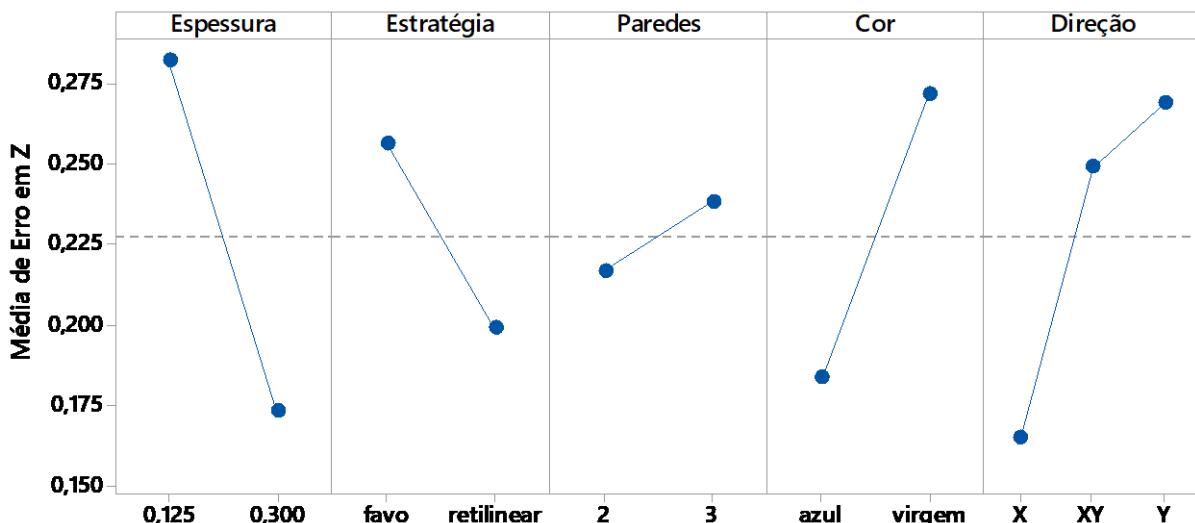


Fonte: Quirino (2019).

Encontram-se nas figuras a seguir deste parágrafo os gráficos dos efeitos principais e interações entre fatores para o módulo de elasticidade de flexão. Em relação aos efeitos principais estatisticamente significativos, observa-se que os erros são maiores com a espessura de camadas menor, estratégia de preenchimento favo em relação a retilínea, cor azul em relação a virgem; e corpos de prova impressos na direção X. Em relação às interações entre fatores estatisticamente significativas, observa-se que para o erro em z: o efeito da diminuição da espessura de camada na resposta é mais expressivo com a estratégia favo do que retilínea; a diminuição da espessura de camada gera um aumento do erro dimensional mais relevante na cor virgem do que na azul; erro em z das peças impressas nas direções X e Y apresenta uma correlação semelhante e negativa com a espessura da camada, porém nas peças impressas na direção

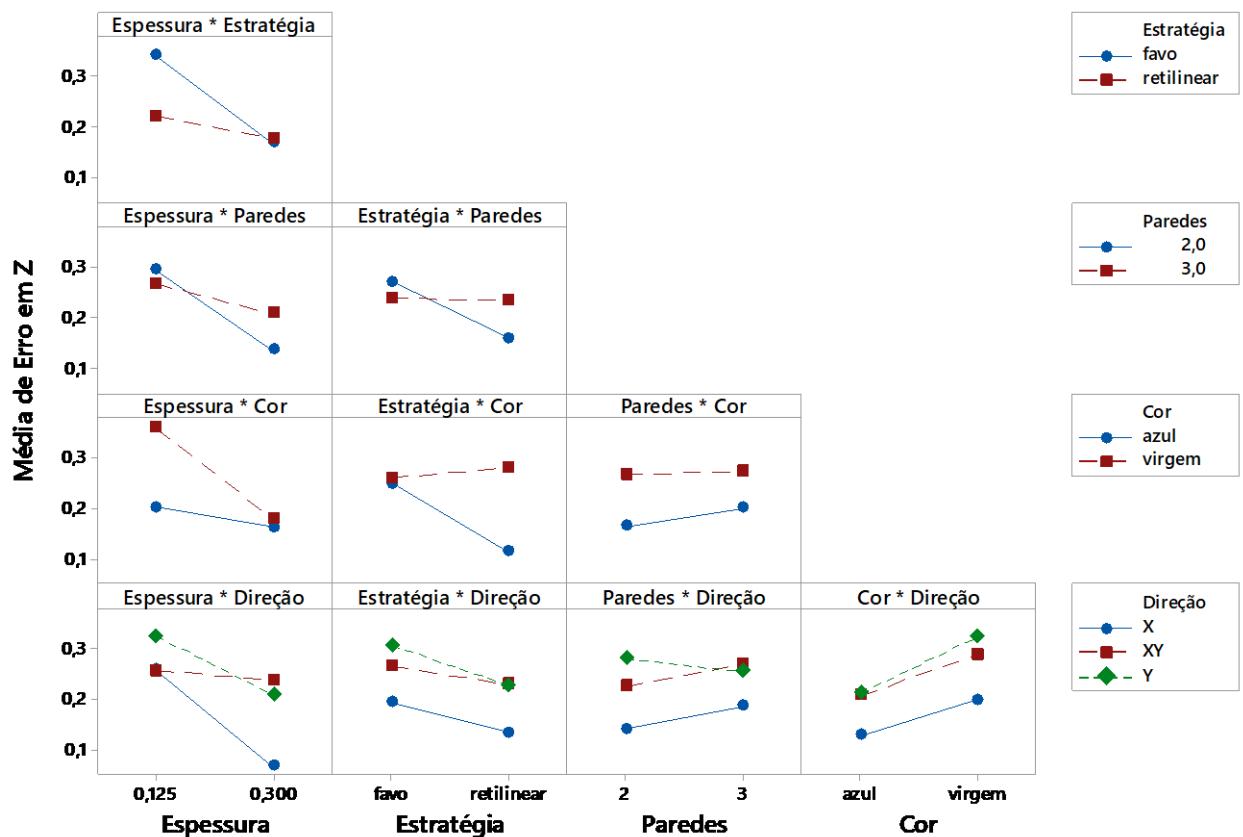
XY a influência da espessura de camada é insignificante; a estratégia retilínea gera erros maiores com a cor virgem do que azul, já a estratégia favo apresenta erros equivalentes para ambas cores (QUIRINO, 2019).

Figura 61 – Gráficos de efeitos principais para erro em z



Fonte: Quirino (2019).

Figura 62 – Gráficos de interações para erro em z

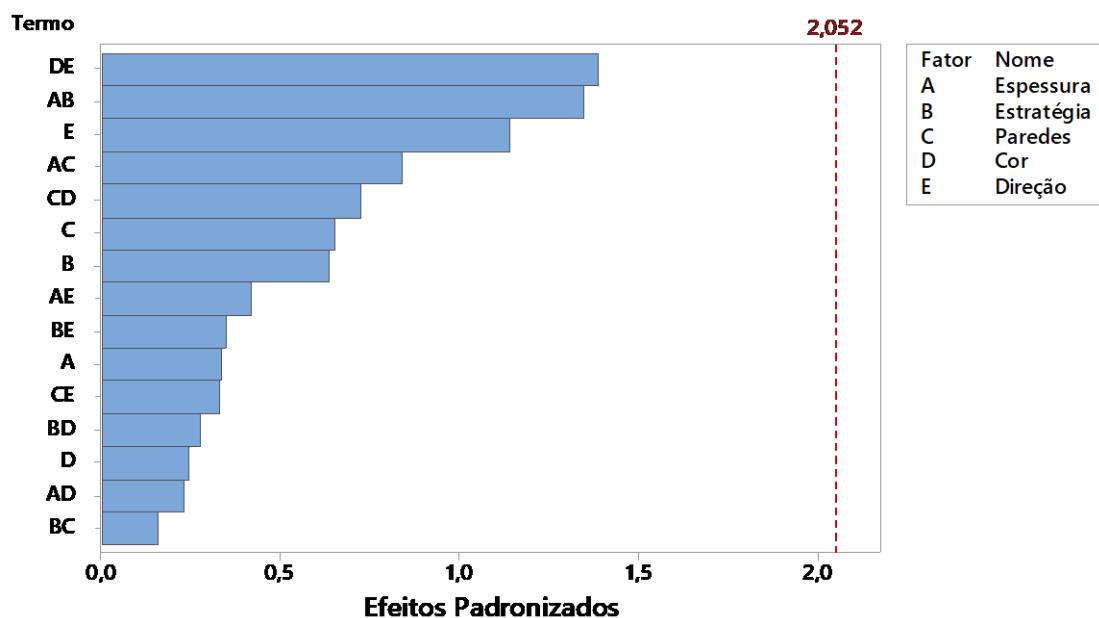


Fonte: Quirino (2019).

4.3.6. Erros dimensionais no plano XY

Conforme mostrado no gráfico de Pareto da Figura 63, a análise dos erros dimensionais no plano XY feita considerando até as interações de segunda ordem não demonstrou existência de nenhum efeito principal ou interação entre fatores estatisticamente significativo (QUIRINO, 2019). Porém, de acordo com o detalhamento feito na seção 2.3, a estratégia de redução de modelo possibilita contornar situações como a desse caso, preservando a hierarquia do modelo. O procedimento é feito pela eliminação dos termos de menor significância estatística, de acordo com o valor-p, e permite simplificar e aumentar a precisão do modelo (MINITAB, 2019).

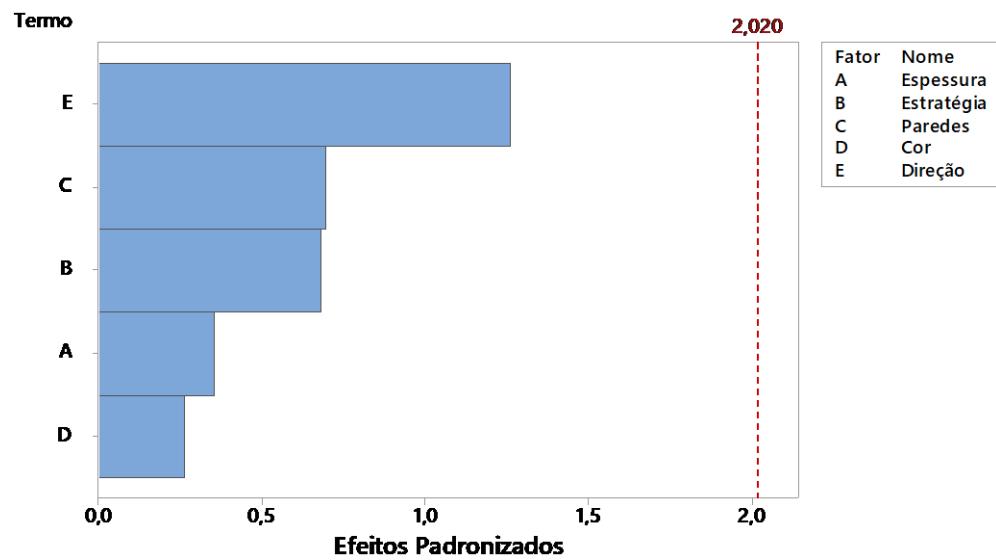
Figura 63 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (erros em XY; $\alpha = 0,05$) sem redução do modelo



Fonte: Quirino (2019).

Portanto, optou-se por prosseguir com uma redução do modelo e análise apenas dos efeitos principais nos erros no plano XY. A partir do gráfico de Pareto do modelo reduzido, Figura 64, observa-se que o efeito mais significativo é referente ao parâmetro direção de impressão. Entretanto, mesmo esse fator de maior influência não apresenta um nível de confiança superior à referência estabelecida de 95%, linha tracejada em vermelho no gráfico. Desse modo, tem-se que a análise de sensibilidade paramétrica para os erros no plano XY é inconclusiva (QUIRINO, 2019).

Figura 64 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (erros em XY; $\alpha = 0,05$) com redução do modelo

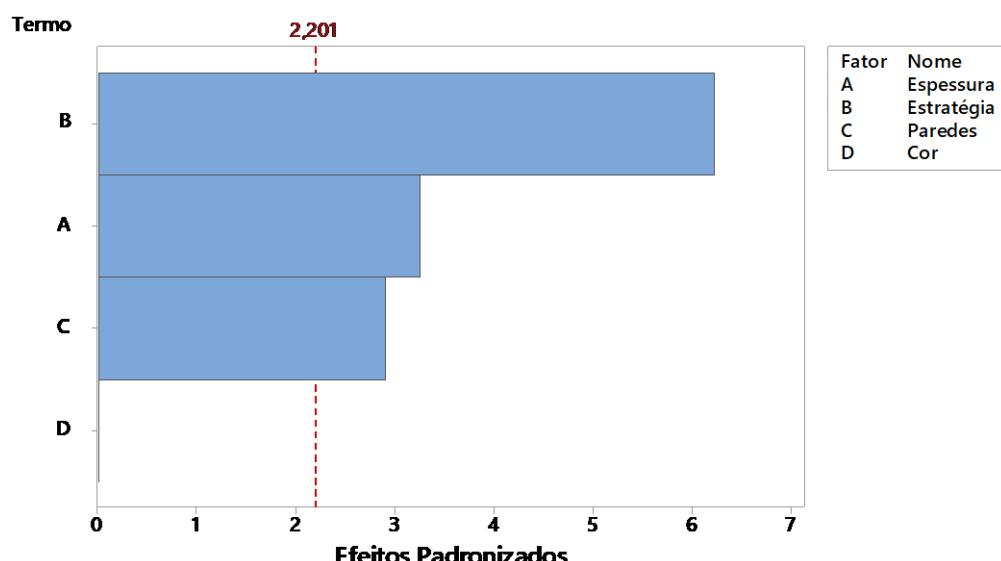


Fonte: Quirino (2019).

4.3.7. Tempo de impressão

Devido aos valores coincidentes das amostras e a desconsideração da direção pelo modo que ocorre a impressão, optou-se por analisar apenas os efeitos principais no tempo de impressão dos corpos de prova da primeira rodada experimental. No gráfico de Pareto da Figura 65, é possível observar a magnitude relativa dos efeitos e verificar quais satisfazem o nível de confiança de 95%, representado pela linha vermelha tracejada (QUIRINO, 2019).

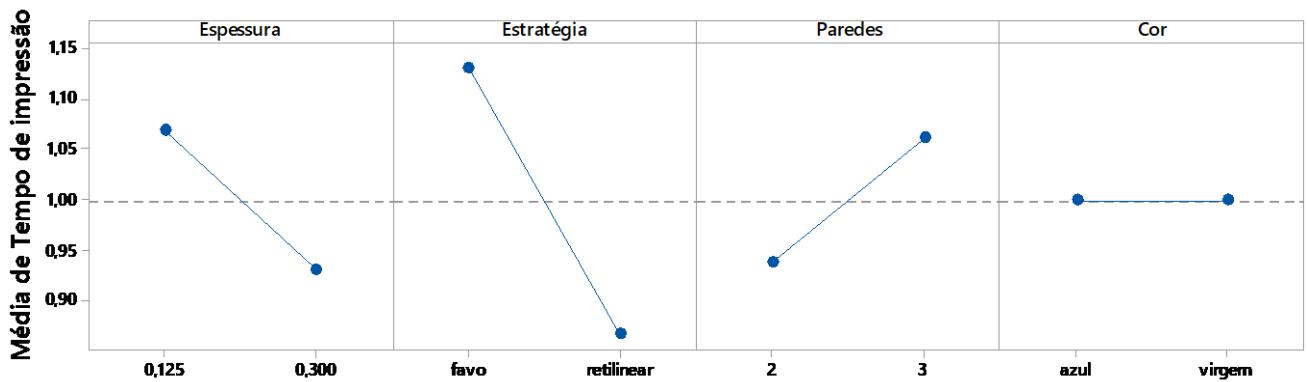
Figura 65 – Gráfico de Pareto de efeitos padronizados (tempo de impressão; $\alpha = 0,05$)



Fonte: Quirino (2019).

Os gráficos apresentados na Figura 66 mostram os efeitos de cada parâmetro no tempo de impressão, normalizado no valor unitário. Observa-se que o aumento da espessura de camada diminui o tempo gasto, a impressão é mais demorada com a estratégia de preenchimento favo em relação a retilínea, o aumento do número de paredes aumenta o tempo gasto. Enquanto que a cor do filamento variando entre azul e virgem não apresentou influência estatisticamente significativa no tempo gasto para impressão dos corpos de prova (QUIRINO, 2019).

Figura 66 – Gráficos de efeitos principais no tempo de impressão



Fonte: Quirino (2019).

4.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Detalha-se nessa seção a análise de sensibilidade paramétrica realizada sobre os parâmetros de impressão avaliados perante métricas de processo e propriedades mecânicas. Objetivando otimização paramétrica para manufatura de dispositivos assistivos por impressão 3D, a análise foi feita com base nos resultados estatísticos dos experimentos combinados ao estudo e revisão da literatura técnica existente, além de terem sido realizadas algumas análises de micrografias.

4.4.1. Efeitos principais

4.4.1.1. Espessura de camada

A espessura de camada foi um parâmetro variável nas duas rodadas experimentais realizadas. Na primeira rodada os níveis utilizados foram 0,125mm e 0,300mm, nesse caso observou-se que o aumento da espessura de camada gerou maior tensão máxima e módulo de tração, menor módulo de flexão, menor tempo de impressão e menor erro dimensional no eixo z. Na segunda rodada experimental trabalhou-se com 0,250mm e 0,300mm de espessura de camada, com a distância entre níveis reduzida verificou-se somente uma correlação levemente positiva entre o aumento da espessura de camada e a tensão máxima e o módulo de flexão. Não houve influência estatisticamente significativa na tração, e o tempo de impressão e erros dimensionais não foram analisados nessa rodada (QUIRINO, 2019).

A diminuição de influência observada é previsível, pois espera-se que o efeito nas respostas observado acerca de um parâmetro contínuo como a espessura de camada esteja relacionado à diferença entre os níveis utilizados. Além disso, os resultados obtidos corroboram ao estudo de Santana (2015), no qual aponta-se que com um bico extrusor de diâmetro 0,4mm a resistência mecânica é superior para peças com espessura de camada entre 0,250mm e 0,300mm. Ou seja, tem-se um resultado idêntico ao observado, cuja lógica segue o caminho de que nessa faixa existe uma aproximação à um sólido uniforme não particionado sem perda de adesão entre camadas, possibilitando maior resistência e rigidez mecânica à peça (CIURANA; SERENÓA; VALLÈS, 2013; FERNANDES, 2017; SANATGAR et al, 2017).

O resultado de menor tempo de impressão para espessura de camada superior também é amplamente reconhecido e compreendido, visto que quanto menor a espessura de camada, mais camadas são necessárias para construir a peça e, portanto, mais tempo é gasto no processo de impressão. Além disso, na primeira rodada experimental observou-se erros dimensionais no eixo z mais expressivos para espessura de camada inferior, pois com isso existe a necessidade de mais camadas, o que tende à uma maior propagação dos erros dimensionais (QUIRINO, 2019; VOLPATO, 2017).

4.4.1.2. Estratégia de preenchimento

A estratégia de preenchimento foi um parâmetro variável na primeira rodada experimental, entre favo e retilínea. Constatou-se que a estratégia favo apresenta melhores respostas em relação às tensões máximas e módulos de elasticidade de tração e de flexão. Todavia, observou-se que a impressão é mais demorada com essa estratégia de preenchimento, pois a complexidade da estrutura faz com que sejam necessárias muitas mudanças de direção durante a impressão, corroborando também para possibilidade de erros dimensionais mais expressivos. Desse modo, tem-se que os efeitos principais desse parâmetro de impressão foram de acordo com o esperado pela teoria e literatura (QUIRINO, 2019, VOLPATO, 2017).

4.4.1.3. Número de paredes

Na primeira rodada experimental o número de paredes variou entre duas e três. Porém, devido à diferença mínima existente entre os níveis estudados e o uso de uma porcentagem de preenchimento elevada de 90%, a influência do número de paredes na resistência mecânica foi insignificante. Ou seja, não foi observada nenhuma influência estatisticamente significativa desse parâmetro nas respostas analisadas, com exceção do tempo de impressão, no qual constatou-se um aumento para um número maior de paredes, resultado esperado devido ao modo que acontece a construção da peça (BROWN, 2019; QUIRINO, 2019).

4.4.1.4. Cor do filamento

Outros estudos reconhecem que pode existir influência da cor do filamento nas propriedades mecânicas das peças impressas devido às alterações causadas nas características do material pelo processo de pigmentação. Buscando averiguar isso, variou-se durante a primeira rodada experimental a cor do filamento entre azul e virgem. Os resultados obtidos corroboram o esperado, pois observou-se maior resistência mecânica, para tração e flexão, nos corpos de prova impressos com filamento de PLA de cor azul (QUIRINO, 2019, WITTBRODT; PEARCE, 2015).

4.4.1.5. Direção de impressão

Estudou-se a direção de impressão como parâmetro variável na primeira rodada experimental, trabalhando com as direções: X, Y e mista XY. Em relação as tensões máximas e módulos de elasticidade de tração e de flexão: observou-se resposta superior para os corpos de prova impressos na direção X, mediana para XY e inferior para Y (QUIRINO, 2019). Os resultados experimentais obtidos estão em concordância ao entendimento teórico de que a distinção estrutural, dependente da direção de impressão, influencia diretamente nas propriedades mecânicas das peças impressas (VOLPATO, 2017).

4.4.1.6. Porcentagem de preenchimento

Na primeira rodada experimental a porcentagem de preenchimento foi um parâmetro fixo em 90%. Enquanto que na segunda rodada houve variação desse parâmetro entre os níveis de 30% e 60% de preenchimento. Os experimentos dessa rodada mostraram uma correlação positiva entre a esse parâmetro de impressão e as tensões máximas e módulos de elasticidade de tração e de flexão. Ou seja, conforme o esperado, uma maior porcentagem de preenchimento proporciona maior resistência e rigidez, pois corresponde à uma maior densidade de material no interior da peça impressa (BRATL, 2013; FERNANDES, 2016; QUIRINO, 2019).

4.4.2. Interações entre fatores

4.4.2.1. Espessura de camada * estratégia de preenchimento

Em relação às tensões máximas e módulos de tração e de flexão: notou-se que o efeito do aumento da espessura de camada é mais expressivo no aumento das respostas com a estratégia de preenchimento favo, já com a estratégia retilínea notou-se um efeito do aumento da espessura de camada praticamente insignificante nas respostas, por vezes até mesmo contrário (QUIRINO, 2019). Essa interação observada entre os dois fatores pode ser compreendida a partir do fato de que são dois parâmetros fundamentais na determinação da estrutura da peça, de modo que o aumento da espessura de camada potencializa a reconhecida resistência mecânica da estratégia favo de preenchimento (VOLPATO, 2017).

Ambas estratégias de preenchimento apresentam resultados sobre erros dimensionais no eixo z equivalentes com espessura de camada de 0,300mm, porém a relação entre diminuição da espessura de camada e aumento dos erros mostrou-se mais expressiva com favo do que retilínea (QUIRINO, 2019). É possível traçar uma explicação sobre isso a partir da complexidade da estrutura favo, construída por hexágonos, o que exige muitas mudanças de direção durante a impressão e, consequentemente, gera mais possibilidades de erros dimensionais.

4.4.2.2. Espessura de camada * cor do filamento

Constatou-se que com filamento de PLA da cor azul o aumento da espessura de camada gera um módulo de elasticidade de flexão maior, enquanto que com a cor virgem o efeito é contrário. Em relação à avaliação do erro dimensional medido no eixo z, tem-se que a diminuição da espessura de camada gera um aumento no erro mais relevante com filamento de cor virgem do que azul (QUIRINO, 2019). Essas interações apontam que pelo fato de o PLA apresentar características diferentes de acordo com sua cor, devido ao processo de pigmentação, observa-se a ocorrência de comportamentos distintos perante a variação do número total de camadas, que acontece devido à alteração da espessura de camada.

4.4.2.3. Espessura de camada * direção de impressão

Observou-se a existência de uma interação entre os fatores espessura de camada e direção de impressão no erro dimensional medido no eixo z. Tal erro apresenta uma correlação semelhante e negativa com a espessura da camada para as peças impressas nas direções X e Y, porém nas peças impressas na direção XY o efeito da espessura de camada no erro em z é insignificante (QUIRINO, 2019). Isso ocorre pois existem diferenças na forma com que é construída a estrutura interna da peça de acordo com a direção de impressão, podendo, no caso de preenchimento retilinear, ser análoga nas direções X e Y e distinta na direção mista XY. Soma-se a isso também o fato de que erros dimensionais estão relacionados à desajustes nos mecanismos de movimentação do bico extrusor da impressora, algo que pode acontecer mais gravemente em uma direção de deslocamento do que em outra (AFROSE et al., 2015; PEI et al., 2015; VOLPATO, 2017).

4.4.2.4. Estratégia de preenchimento * cor do filamento

Observou-se que o efeito da mudança de estratégia de preenchimento de favo pra retilinear na diminuição da tensão máxima e módulo tração é praticamente insignificante com filamento da cor azul, e mais expressivo com virgem. Em relação ao erro dimensional no eixo z, constatou-se que a estratégia retilinear gera erros maiores com a cor virgem do que azul, já a estratégia favo apresenta erros equivalentes para ambas cores (QUIRINO, 2019).

A interação observada em relação à resistência mecânica reforça o entendimento de que a cor do filamento pode influenciar nas propriedades da peça, visto que a cor azul apresentou bons resultados independentemente da estratégia de preenchimento. É valido ressaltar que todas as respostas citadas, incluindo os erros dimensionais medidos em z, praticamente não foram influenciadas pela cor do filamento quando utilizada a estratégia favo de preenchimento, somente houve diferença significativa quando utilizada a estratégia retilinear de preenchimento. Ou seja, notou-se que a estratégia de preenchimento pode potencializar ou amenizar as diferenças de características existentes, devido ao processo de pigmentação, entre filamentos de PLA de cores distintas (WITTBRODT; PEARCE, 2015).

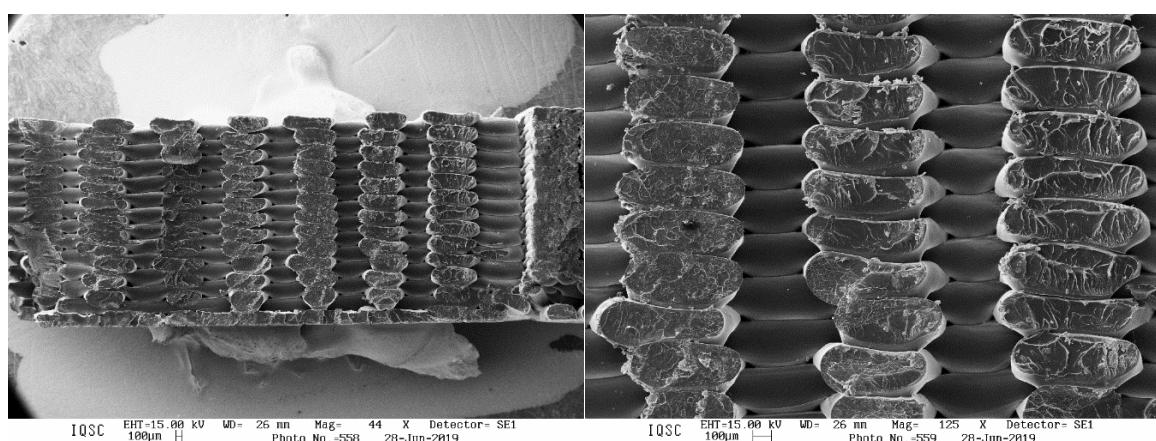
4.4.2.5. Estratégia de preenchimento * direção de impressão

Em relação ao módulo de tração e tensão máxima de flexão, observou-se que em ambos casos as respostas obtidas para as direções X e Y com estratégia de preenchimento retilínea são equivalentes, mas que com estratégia favo existem diferenças nas respostas conforme a direção de impressão (QUIRINO, 2019). Isso é esperado, pois a forma que se dá o construção do preenchimento na estratégia retilínea nas direções X e Y é o mesmo, de $-45^\circ/+45^\circ$, enquanto que na estratégia favo, os hexágonos da estrutura, não são ortogonais aos eixos de impressão e, portanto, não existe equivalência estrutural entre peças impressas em direções diferentes (AFROSE et al., 2015; PEI et al., 2015; VOLPATO, 2017).

4.4.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Nessa seção expõe-se uma breve análise das micrografias obtidas de alguns corpos de prova de tração. Na Figura 67 tem-se a microografia de um corpo de prova impresso com espessura de camada de 0,125mm, estratégia de preenchimento retilínea e direção de impressão XY. Devido à diminuição da viscosidade do PLA decorrente do aumento da temperatura, é possível observar que o filamento perde o seu perfil circular e adota um perfil oval na estruturação da peça, isso proporciona maior área de contato entre camadas e, portanto, maior resistência mecânica. (FERNANDES, 2017; QUIRINO, 2019; SANATGAR et al, 2017)

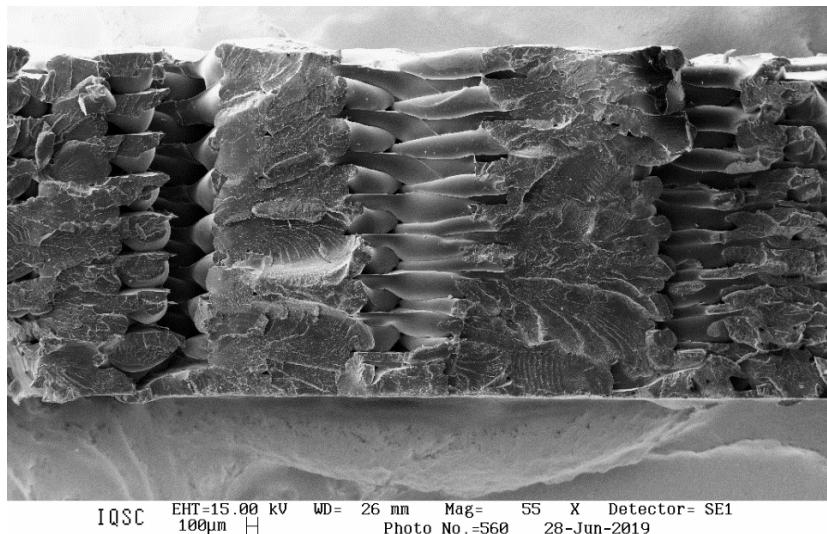
Figura 67 – Micrografia do corpo de prova 9 de tração



Fonte: Quirino (2019).

Na Figura 68 tem-se a micrografia de um corpo de prova, que apresentou boa resistência à tração, com espessura de camada de 0,300mm, estratégia de preenchimento retilinear e direção de impressão Y. Na figura pode-se observar que houve muita adesão entre camadas, corroborando no bom desempenho mecânico apresentado. (FERNANDES, 2017; QUIRINO, 2019; SANATGAR et al, 2017)

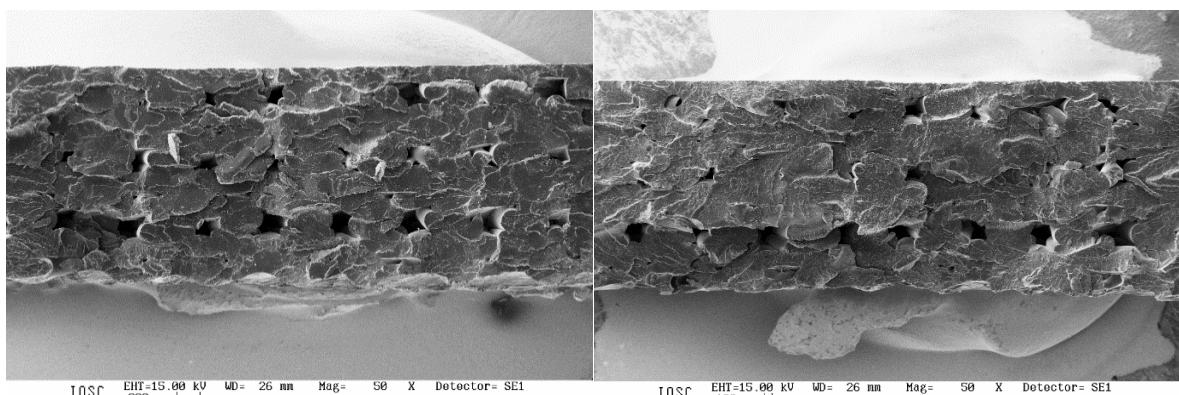
Figura 68 – Micrografia do corpo de prova 35 de tração



Fonte: Quirino (2019).

As micrografias expostas na Figura 69, obtidas para corpos de prova impressos com estratégia de favo são mais difíceis de serem analisadas do que as anteriormente mostradas de estratégia retilinear. Entretanto é perceptível a boa adesão entre camadas, relacionada ao índice de empacotamento, aproximando a peça a um corpo sólido não particionado, justificando assim que as melhores respostas perante os ensaios tenham sido com a estratégia de preenchimento favo (FERNANDES, 2017; QUIRINO, 2019; SANATGAR et al, 2017).

Figura 69 – Micrografia do corpo de prova 39 e 41 de tração



Fonte: Quirino (2019).

4.4.4. Análise paramétrica

Essa seção visa apresentar considerações sobre a análise paramétrica da impressão de dispositivos assistivos com objetivo de maximizar as propriedades mecânicas e atingir boas métricas de processo. Isso será feito considerando a ordem de influência dos parâmetros, observada durante a análise estatística dos experimentos. Nesse contexto, destaca-se primeiramente que a porcentagem de preenchimento tem clara correlação positiva com as propriedades mecânicas e o tempo de impressão, portanto a análise de otimização apresentada nessa seção considera um preenchimento de 90%, nível mais alto utilizado nos experimentos.

Entre os demais parâmetros de impressão variados durante os experimentos, a estratégia de preenchimento e a espessura de camada foram os fatores que apresentaram efeitos de maior destaque, seguidos pelo efeito de interação entre esses dois fatores, e posteriormente pela cor do filamento, direção de impressão e número de paredes. De modo que a continuação das considerações sobre a análise paramétrica, nos parágrafos seguintes a esse, terá como base essa ordem de influência observada

Na tensão máxima de tração, quando com estratégia de preenchimento favo, o aumento da espessura de camada de 0,125mm para 0,300mm praticamente dobrou o resultado. Enquanto que com a estratégia retilínea, o efeito do aumento da espessura de camada não foi significativo e a tensão máxima de tração manteve-se em um valor intermediário em ambos casos. O mesmo comportamento descrito foi observado para as demais propriedades mecânicas analisadas: módulo de tração, tensão máxima e módulo de flexão. A única distinção é que para esses casos a resposta com estratégia de preenchimento retilínea não foi intermediária e sim levemente inferior à estratégia favo independentemente da espessura de camada utilizada. Ressalta-se ainda que entre os valores usados na segunda rodada experimental de 0,250mm e 0,300mm, o efeito descrito do aumento da espessura teve influência significativa somente nas respostas de flexão.

De modo geral, observou-se que a estratégia de preenchimento favo sempre apresentou maior resistência mecânica do que a retilínea. Porém, está atrelado ao uso dessa estratégia um aumento no tempo de impressão de cerca de 40% em

média. Mas, como exposto anteriormente, a estratégia de preenchimento favo apresentou melhores resultados com a espessura de camada superior, logo, minimiza-se essa questão, pois a mudança de espessura de camada de 0,125mm para 0,300mm reduz o tempo de impressão em cerca de 20% em média.

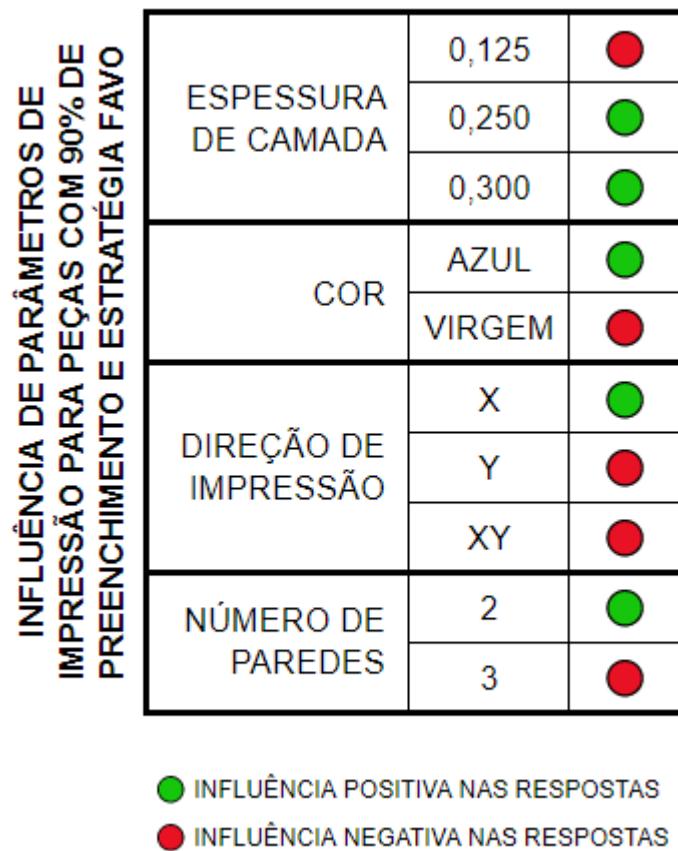
Portanto, com porcentagem de preenchimento elevada e bico de extrusão de diâmetro 0,400mm, recomenda-se a utilização da estratégia de preenchimento favo, em detrimento à retilinear, combinada com uma espessura de camada próxima à 0,250mm e 0,300mm, conforme disponibilidade.

Em relação à cor, observou-se maior resistência quando utilizado o PLA azul do que virgem. Todavia, essa diferença foi minimizada em peças com estratégia de preenchimento favo. Como não existe distinção entre o tempo de impressão gasto, recomenda-se utilizar cor azul se possível, com a ressalva de que os resultados obtidos nesse trabalho podem variar conforme o método de pigmentação utilizado que pode alterar de formas distintas as características do PLA.

Com a estratégia favo observou-se melhores propriedades para peças impressas na direção X. A diferença existente para as demais direções deve-se ao fato de que estratégia de preenchimento do tipo favo os hexágonos que compõem a estrutura interna da peça não são ortogonais aos eixos, ou seja, não existe equivalência estrutural entre peças impressas em direções diferentes. Os corpos de prova têm claramente uma direção definida, visto sua geometria, porém nos casos de dispositivos assistivos deve-se considerar a informação descrita nesse parágrafo em conjunto da análise dos esforços e suas direções, para desse modo poder definir a impressão do dispositivo de modo que o eixo X de impressão seja coincidente à direção mais requisitada mecanicamente.

O número de paredes foi o último parâmetro em termos de influência nas respostas analisadas, observou-se efeito significativo apenas no tempo de impressão, com aumento de cerca de 20% em média ao mudar de duas para três paredes. A não influência nas propriedades mecânicas observadas aconteceu devido à diferença mínima entre os níveis e ao preenchimento elevado de 90%. Desse modo, no cenário estudado, a escolha de um número de paredes maior não se mostrou uma decisão relevante.

Figura 70 – Infográfico resumo da análise paramétrica.



Fonte: elaborado pelo autor.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A monografia cumpriu as expectativas geradas por sua principal motivação, que era analisar a utilização da técnica de manufatura aditiva FFF para fabricação de dispositivos assistivos de PLA perante conceitos de desenvolvimento de produto centrado no usuário. O escopo resumido da monografia envolveu: a análise do uso de manufatura aditiva na área de tecnologia assistiva, o que permitiu entendimento dos desafios e requisitos envolvidos; e a análise de sensibilidade e otimização paramétrica, feita através da caracterização experimental de corpos de prova com base nos procedimentos estatísticos do DOE. Com o escopo tratado, cumpriu-se a pretensão estabelecida de ampliar, aprofundar e consolidar os conhecimentos sobre a aplicação de manufatura aditiva em dispositivos assistivos.

No âmbito de tecnologia assistiva, essa monografia possibilitou uma ampla compreensão do contexto social do desenvolvimento de produto voltados à essa área ao abordar informações alarmantes como a de que cerca de 600 milhões de pessoas no mundo não possuem acesso à dispositivos assistivos adequados (DE COUVREUR; GOOSSENS, 2011). Reforça-se que para promover e assegurar o pleno exercício dos direitos humanos e liberdades fundamentais das pessoas com deficiência, deve-se considerar a tecnologia assistiva como uma necessidade básica, pois com o acesso aos recursos necessários a realidade de incapacidade e segregação pode ser transformada em possibilidade funcional e participação. O estudo realizado permitiu observar que essa transformação ocorre a partir de políticas, ações e recursos que possibilitem maior qualidade de vida, independência e inclusão social através da ampliação e consolidação das capacidades individuais.

A partir das informações analisadas durante a pesquisa, notou-se que, apesar dos avanços em tecnologia assistiva, o Brasil está no início de uma longa jornada, apresentando ainda grande déficit no atendimento da população com deficiência. E mesmo diante dessa demanda reprimida o estágio nacional de incentivo na área de tecnologia assistiva é embrionário. Nesse contexto, destaca-se a importância de atentar-se às elevadas taxas de subutilização e abandono dos dispositivos, uma realidade que causa graves prejuízos tanto individuais, quanto coletivos, e é fortemente impulsionada pelo não atendimento das necessidades específicas de

cada usuário. Portanto, conclui-se que é fundamental que o processo de desenvolvimento de dispositivos assistivos seja centrado no usuário, suas necessidades e demandas devem sempre estar em foco para que seja possível promover inclusão social ao oferecer produtos que possibilitem maior eficiência e autonomia nas atividades da pessoa com deficiência. Nesse contexto, a monografia permitiu observar como principais vantagens da aplicação da manufatura aditiva na fabricação de dispositivos assistivos: a possibilidade efetiva de customização com foco nos usuários e suas especificidades; a diminuição dos custos envolvidos; a redução do tempo de desenvolvimento e de fabricação. De maneira geral, pode-se concluir que a utilização da manufatura aditiva na área de tecnologia assistiva é muito vantajosa, pois possibilita a individualização dos dispositivos, o que contribui diretamente para a aceitação e satisfação dos usuários.

Através da análise da aplicação de manufatura aditiva na área da saúde foi possível concluir que os avanços dessa área estão contribuindo significativamente para o desenvolvimento de novas soluções de tecnologia assistiva, visando atender simultaneamente requisitos técnicos, econômicos e sociais. Nesse cenário, observou-se a relevância da realização de estudos sobre os efeitos dos parâmetros de impressão nas métricas de processo e no desempenho mecânico das peças. Destaca-se, portanto, o uso do *Design of Experiments* (DOE) nessa monografia, metodologia que ajuda a aproximar satisfatoriamente a função que relaciona as entradas e saídas do sistema, permitindo posteriormente uma análise eficiente de otimização paramétrica. Em relação aos experimentos analisados, decidiu-se focar o estudo na técnica de manufatura aditiva FFF, visto que essa é a mais utilizada na área de tecnologia assistiva, pois possibilita peças resistentes com custo relativamente baixo. Em relação ao material de impressão escolhido, optou-se pelo PLA em detrimento ao ABS devido ao melhor desempenho mecânico e a não emissão de gases nocivos, o que possibilita utilizar impressoras dentro de ambientes de saúde. Analisaram-se duas rodadas experimentais, sendo que na primeira foram cinco parâmetros variáveis: espessura de camada, estratégia de preenchimento, número de paredes, cor do filamento e direção de impressão. Enquanto que na segunda rodada experimental realizaram-se novos experimentos com variação menor de espessura de camada, acrescentando a porcentagem de

preenchimento como o outro fator variável, e fixando os demais parâmetros no nível de melhor resposta mecânica observado na rodada anterior.

A partir dos resultados estatísticos das rodadas experimentais, fez-se uma análise de otimização paramétrica para a fabricação de dispositivos assistivos por manufatura aditiva, buscando maximizar as propriedades mecânicas e atingir boas métricas de processo. Nesse contexto, destaca-se que o fator porcentagem de preenchimento teve forte correlação positiva com a resistência mecânica e com o tempo de impressão. Enquanto que entre os demais parâmetros analisados, os efeitos da estratégia de preenchimento e da espessura de camada foram os de maior destaque nas respostas medidas, seguidos pela interação entre esses dois fatores, e posteriormente pelos efeitos dos parâmetros de cor do filamento, direção de impressão e número de paredes. Corpos de prova impressos com a estratégia de preenchimento favo apresentaram, em geral, maior resistência mecânica em relação aos que utilizaram estratégia retilinear. Além disso, verificou-se que as propriedades mecânicas de peças com preenchimento favo foram potencializadas pelo uso de espessura de camada maior. Isso deve-se à interessante interação entre esses fatores que proporciona boa resistência mecânica em um tempo razoável de impressão, visto que a estratégia favo tende a aumentar o tempo de impressão enquanto que o aumento da espessura de camada tem efeito contrário nessa métrica. Em relação à cor, observou-se maior resistência quando utilizado o filamento de PLA azul do que virgem, o que reforça as pressuposições de existência de alteração das características mecânicas do material devido ao processo de pigmentação. Porém é válido ressaltar que esse efeito foi minimizado ao usar a estratégia favo de preenchimento. Ainda sobre essa estratégia: observou-se melhores propriedades para peças impressas na direção X ao utilizá-la. Com isso, pode-se concluir que as propriedades mecânicas com estratégia favo também dependem da direção de impressão, pois os hexágonos que compõem a estrutura interna da peça não são ortogonais aos eixos, ou seja, não existe equivalência estrutural entre peças impressas em direções diferentes. Diferente dos demais parâmetros, devido à diferença mínima entre os níveis e ao preenchimento elevado, o número de paredes teve efeito significativo apenas no tempo de impressão.

Em complemento à análise estatística, as análises das micrografias de alguns corpos de prova de tração permitiram observar que, devido à diminuição da viscosidade do PLA decorrente do aumento da temperatura, o filamento perde o seu perfil circular e adota um perfil oval na estruturação da peça, proporcionando maior área de contato entre camadas e, portanto, maior resistência mecânica. Nesse sentido, destaca-se o conceito de índice de empacotamento, que está relacionado à adesão entre camadas e ao quanto a peça impressa se aproxima de um corpo sólido não particionado. Foi observado um favorecimento desse índice pela estratégia de preenchimento favo, ou seja, a análise de micrografia corroborou os resultados estatísticos que demonstraram que a estratégia favo como um fator que provém maior resistência mecânica à peça.

Em resumo, essa monografia permitiu reconhecimento de que são condições fundamentais na busca por soluções assertivas no desenvolvimento de dispositivos assistivos a utilização de técnicas e metodologias que contribuam para construção efetiva de um repertório interdisciplinar entre áreas de engenharia e de saúde. Além disso, a monografia reforça a importância da participação direta do usuário para que através da customização, possibilitada pelo uso da manufatura aditiva, suas necessidades e demandas específicas sejam atendidas, visto que isso contribui significativamente para a redução das taxas de subutilização e abandono.

A associação entre manufatura aditiva e tecnologia assistiva é uma temática ainda recente e em expansão, apresentando considerável espaço para progresso e evolução. Nesse contexto, as sugestões de trabalhos futuros em continuação à essa monografia incluem: realização de mais análises microestruturais para melhor compreensão de efeitos térmicos; ampliação da gama de parâmetros e níveis estudados; construção de protótipos funcionais; estudo da influência dos parâmetros de impressão na rugosidade superficial e na resistência à fadiga; aplicação de metodologias para avaliar respostas subjetivas do usuário e as correlacionar com os parâmetros de impressão; desenvolvimento de uma metodologia de projeto de engenharia voltado à tecnologia assistiva; análise da influência do processo de pigmentação na mudança das características mecânicas do PLA. Além disso, existe ainda fora da área de engenharia a possibilidade de pesquisas mais aprofundadas acerca do contexto social da tecnologia assistiva.

REFERÊNCIAS

3DAPPLICATIONS. Características do ABS e PLA na impressão 3D. Disponível em: <<https://www.3dapplications.com.br/>>. Acesso em: 19 set. 2020.

3DCLONER. Impressora 3DClonerDH. Disponível em: <<http://3dcloner.ind.br/>>. Acesso em: 19 set. 2018.

3DFILA. Filamento PETG: como imprimir com esse filamento para impressora 3D. Disponível em: <<https://3dlab.com.br/como-imprimir-com-o-filamento-petg/>>. Acesso em: 26 nov. 2020a.

3DFILA. Guia completo para filamento Flexível TPU. Disponível em: <<https://3dfa.com.br/guia-completo-para-filamento-flexivel-tpu/>>. Acesso em: 26 nov. 2020b.

ABRAS, C. et al. User-centered design. Bainbridge, W. Encyclopedia of Human-Computer Interaction. Thousand Oaks: Sage Publications, v. 37, n. 4, p. 445-456, 2004.

AFROSE, M.F.; MASOOD, S.H.; NIKZAD, M. Effects of build orientations on tensile properties of PLA material processed by FDM. Trans Tech Publications, 2015.

AGARWAL, A.; MEYER, A. Beyond usability: evaluating emotional response as an integral part of the user experience. In: CHI'09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. 2009. p. 2919-2930.

ALON, G.; MCBRIDE, K. Persons with C5 or C6 tetraplegia achieve selected functional gains using a neuroprosthesis. Archives of physical medicine and rehabilitation, v. 84, n. 1, p. 119-124, 2003.

ANDERSON, M. J.; WHITCOMB, P. J. DOE simplified: practical tools for effective experimentation. Productivity Press, 2016.

ARRUDA, A. J. V. et al. design e os processos de Inovação Social como agentes transformadores em comunidades criativas.

ASLAKSEN, F et al. Universal design. Planning and design for all. The Norwegian State Council on Disability. 1997. Disponível em: <http://home.online.no/bringa/universal.htm>. Acesso em: 18 out. 2020.

ASTM D638-14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM D790-17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM F2792-12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies' (Withdrawn 2015). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

BARBOSA, P. S. H.; TEIXEIRA-SALMELA, L. F.; DA CRUZ, R. B. Reabilitação das fraturas do rádio distal. *Acta Ortopédica Brasileira*, v. 17, n. 3, p. 182-186, 2009.

BAXTER, M. Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos. Editora Blucher, 2011.

BENCHARIT, S. et al. In vivo tooth-supported implant surgical guides fabricated with desktop stereolithographic printers: fully guided surgery is more accurate than partially guided surgery. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, v. 76, n. 7, p. 1431-1439, 2018.

BERKHOUT, F.; SMITH, D. Products and the environment: an integrated approach to policy. *European Environment*, v. 9, n. 5, p. 174-185, 1999.

BERSCH, R. Introdução à tecnologia assistiva. Porto Alegre: CEDI, v. 21, 2017.

BIDDISS, E.; CHAU, T. Upper-limb prosthetics: critical factors in device abandonment. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, v. 86, n. 12, p. 977-987, 2007.

BONOTTO, E.; SENA, P. O design social segundo designers. Pierson Sena, 12 jul. 2016. Disponível em: <<http://piersonsenablogspot.com.br/2008/10/odesign-social-segundo-designers.html>>. Acesso em: 18 out. 2020.

BORDEGONI, M. et al. A method for bringing user experience upstream to design: This paper intends to correlate human emotional response to product physical characteristics. *Virtual and Physical Prototyping*, v. 9, n. 3, p. 181-194, 2014.

BOURELL, D. et al. Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, v. 66, n. 2, p. 659-681, 2017.

BRASIL. Constituição da república federativa do Brasil. Brasília: Senado Federal, Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. Decreto nº 3.298, de 20 de dezembro de 1999. Regulamenta a Lei nº 7.853, de 24 de outubro de 1989, dispõe sobre a Política Nacional para a Integração da Pessoa Portadora de Deficiência, consolida as normas de proteção, e dá outras providências.

BRASIL. Decreto Nº 6.214, de 26 de setembro de 2007. Regulamenta o benefício de prestação continuada da assistência social devido à pessoa com deficiência e ao idoso de que trata a Lei nº 8.742, de 7 de dezembro de 1993, e a Lei nº 10.741, de 1º de outubro de 2003, acresce parágrafo ao art. 162 do Decreto nº 3.048, de 6 de maio de 1999, e dá outras providências.

BRASIL. Decreto nº 6.949, de 25 de agosto de 2009. Promulga a Convenção Internacional sobre os Direitos das Pessoas com Deficiência e seu Protocolo Facultativo, assinados em Nova York, em 30 de março de 2007.

BRASIL. Lei complementar nº 13.146 de 06 de junho de 2015. Institui a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência).

BRASIL. Lei Nº 13.146, de 6 de julho de 2015. Institui a Lei Brasileira de Inclusão da Pessoa com Deficiência (Estatuto da Pessoa com Deficiência).

BRASIL. Secretaria Especial dos Direitos Humanos. Coordenadoria Nacional para Integração da Pessoa Portadora de Deficiência. Comitê de Ajudas Técnicas [CAT]. Ata da VII Reunião do Comitê de Ajudas Técnicas, de 2007.

BRATL, Mathias. Customizable personal manufacturing. 2013. Tese de Doutorado. Master Thesis, Fachhochschule Der Wirtschaft, Hannover.

BROWN, D. 3D prototypes and models. Disponível em: <<http://3dprototypesandmodels.com.au/3d-printing-terminology-specifications/>>. Acesso em: 19 abr. 2020.

BRUNS, R. E.; NETO, B. Barros; SCARMÍNIO, I. S. Como fazer experimentos. Editora da Unicamp, Campinas, 2001.

BUEHLER, E. et al. Investigating the Implications of 3D Printing in Special Education. ACM Transactions on Accessible Computing. v. 8, n. 3, p. 28, 2016.

CABRAL, C. A. D. et al. Reflexões da terapia ocupacional sobre a utilização da impressora 3d para manufatura de órteses para membros superiores. Reflexões da terapia ocupacional sobre a utilização da impressora 3d para manufatura de órteses para membros superiores, p. 1-388–416. 2019.

CALLISTER JR W. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 705p, 2008.

CAMPBELL, I.; BOURELL, D.; GIBSON, I. Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. Rapid prototyping journal, v. 18, n. 4, p. 255-258, 2012.

CANEVAROLO JR, S. V. Ciência dos Polímeros: Um texto básico para Tecnólogos e Engenheiros. São Paulo, Artliber Editora, 2006.

CAQI-IQSC-USP. Microscópio Eletrônico de Varredura. Disponível em: <<http://caqi.iqsc.usp.br/tecnicas-de-microscopia/microscopio-eletronico-de-varredura>>. Acesso em: mar. 2019.

CARRASCO, F. et al. Processing of poly (lactic acid): characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. Polymer Degradation and stability, Elsevier, v. 95, n. 2, p. 116–125, 2010.

CARVALHO, A. A. A recuperação funcional e a adaptação social dos amputados. 1958.

CHENG, L. C.; MELO FILHO, L. D. R. QFD: desdobramento da função qualidade na gestão de desenvolvimento de produtos. Editora Blucher, 2007.

CHUA, C. K.; LEONG, K. F. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications (with Companion Media Pack) of Rapid Prototyping Fourth Edition. World Scientific Publishing Company, 2014.

CIURANA, J.; SERENÓA, L.; VALLÈS, È.. Selecting process parameters in RepRap additive manufacturing system for PLA scaffolds manufacture. Procedia Cirp, v. 5, p. 152-157, 2013.

COMITÊ DE AJUDAS TÉCNICAS (CAT). Tecnologia assistiva. Brasília: Corde, 2009.

COOK, A. M.; POLGAR, J. M. Cook and Hussey's Assistive Technologies-E-Book: Principles and Practice. Elsevier Health Sciences, 2013.

COSTA, P. C. R. O design de costumização das cadeiras de rodas. 2012.

CRUMP, S. S. The fused deposition modelling (FDM). US Patent, n. 5.121, p. 329, 1988.

CRUZ, D. et al. Assistive technology accessibility and abandonment: challenges for occupational therapists. The Open Journal of Occupational Therapy, v. 4, n. 1, p. 10, 2016.

DA SILVA, J. V. L.; MAIA, I. A. Desenvolvimento de dispositivos de tecnologia assistiva utilizando impressão 3D. CNRTA-CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM TECNOLOGIA ASSISTIVA (Organizador), p. 33, 2014.

DE COUVREUR, L.; GOOSSENS, R. Design for (every) one: co-creation as a bridge between universal design and rehabilitation engineering. CoDesign, v. 7, n. 2, p. 107-121, 2011.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. EdiPUCRS, 2007.

DEMARCHI, G. S. et al. O Desenho Paramétrico como facilitador na personalização de órteses para Tecnologia Assistiva. 2017.

DIFALLAH, B. B.; KHARRAT, M.; DAMMAK, M.; MONTEIL, G., Mechanical and tribological response of ABS polymer matrix filled with graphite powder, Materials and Design, v. 34, 782–787, 2012.

DINIZ, D. Deficiência e Políticas Sociais – Entrevista com Colin Barnes. SER Social, Brasília, v. 15, n. 32, p. 237-251, jan./jun. 2013. Disponível em <http://periodicos.unb.br/index.php/SER_Social/article/view/9514/7088>. Acesso em: set. 2020.

DOMINGO-ESPIN, M. et al. Influence of building parameters on the dynamic mechanical properties of polycarbonate fused deposition modeling parts. 3D Printing and Additive Manufacturing, v. 1, n. 2, p. 70-77, 2014.

EDELSTEIN, J. E.; BRUCKNER, J. Órteses - Abordagem Clínica. Série Physio - Fisioterapia Prática. Rio de Janeiro: Editora LAB, 2006.

EHRENSTEIN, G. W.; THERIAULT, R. P. Polymeric materials: structure, properties, applications, Hanser Verlag p. 67-78. 2001.

FERRARI, A. L. M et al. IMPRESSÃO 3D E TECNOLOGIA ASSISTIVA: um estudo de análise da produção científica nos últimos dez anos. Human Factors in Design, v. 8, n. 16, p. 051-063, 2019.

FERNANDES, D. J. et al. Development of 70/30 Poly-L-dL-Lactic Acid Filaments for 3D Printers (Part 1): Filament Manufacturing and Characterization of Printed Samples for Use as Bioabsorbable Products. JOM, v. 69, n. 1, p. 71-77, 2017.

FERNANDES, M. Estudo da influência de parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PLA. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica - Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016.

FIREFLAY. Special Needs Blog. 8 Ways the 3D printing revolution will help children with disabilities. Publicado em 05/02/2014. Disponível em:

<<http://www.fireflyfriends.com/specialneeds-blog/specific/8-ways-the-3d-printing-revolution-will-help-children-with-disabilities>>. Acesso em: 06/04/2020

FLORIO, W. Modelagem paramétrica, criatividade e projeto: duas experiências com estudantes de arquitetura. *Gestão & Tecnologia de Projetos*, v. 6, n. 2, p. 43-66, 2011.

FOGGIATTO, J. S.; VOLPATO, N.; BONTORIN, A. C. B.; Recomendações para modelagem em sistemas CAD-3D. 4º COBEF. São Paulo, 2007.

FORD, S.; DESPEISSE, M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, v. 137, p. 1573-1587, 2016.

FRANKE, N.; KEINZ, P.; STEGER, C. J. Customization: a goldmine or a wasteland?. *Marketing Intelligence Review*, v. 2, n. 2, p. 26-33, 2010.

GALDAMEZ, E. V. C.; CARPINETTI, L. C. R. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica. *Gestão & Produção*, v. 11, n. 1, p. 121-134, 2004.

GALLOWAY, R. 3D Printing and the Future of Prosthetics, Forbes, 24/07/2013. Disponível em: <http://www.forbes.com/sites/toyota/2013/07/24/3d-printing-and-the-future-of-prosthetics/>. Acesso em: set. 2019.

GALVÃO FILHO, T. A. A Tecnologia Assistiva: de que se trata. *Conexões: educação, comunicação, inclusão e interculturalidade*, v. 1, p. 207-235, 2009.

GARCIA, J. C. D. Deficiência e Tecnologia Assistiva: Conceitos e Implicações para as Políticas Públicas. CNRTA-CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM TECNOLOGIA ASSISTIVA (Organizador), p. 69, 2014.

GARCIA, J. C. D.; GALVÃO FILHO, T. A. Pesquisa nacional de TA. São Paulo: ITS Brasil/MCTI-Secis, v. 22, 2012. Disponível em: <<http://www.santoandre.sp.gov.br/pesquisa/ebooks/368505.pdf>> Acesso em: 04/11/2020.

- GARRET, B.; REDWOOD, B.; SCHÖFFER, F. The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications. 2017.
- GIBSON, I. et al. Additive manufacturing technologies. New York: Springer, 2014.
- GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Business opportunities and future directions. In: Additive Manufacturing Technologies. Springer, New York, NY, 2015.
- GLASS, D.; MEYER, A.; ROSE, D. Universal design for learning and the arts. Harvard Educational Review, v. 33, n. 1, p. 98-119, 2013.
- GUIMARÃES, B. M. Inclusão laboral da pessoa com deficiência: proposta de ferramentas para identificação da capacidade funcional, das exigências da tarefa e do desempenho. 2015. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Artes e Comunicação, Programa de Pós-Graduação em Design, 2015.
- HARADA, J.; WIEBECK, H. Plásticos de Engenharia-Tecnologia e Aplicações. São Paulo, SP: Ed. Artliber Ltda, 2005.
- HARRIS, N. The design and development of assistive technology. IEEE Potentials, v. 36, n. 1, p. 24-28, 2017.
- HASSENZAHL, M. Aesthetics in interactive products: Correlates and consequences of beauty. In: Product experience. Elsevier, 2008. p. 287-302.
- HORIZONTE, B. Programa: Design e Saúde. 2012. pp.1–9.
- HU, J. S., Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP 7 (2013), p.3–8.
- HUNT, Emily J. et al. Polymer recycling codes for distributed manufacturing with 3-D printers. Resources, Conservation and Recycling, v. 97, p. 24-30, 2015.
- HURST, A.; KANE, S. Making Accessible. Proceedings of the 12th International Conference on Interaction Design and Children. ACM, p. 635-638, 2013.

IBGE. Censo demográfico 2010: características gerais da população, religião e pessoas com deficiência. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012.

ISHENGOMA, F. R.; MTAHO, A. B. 3D Printing: Developing Countries Perspectives. International Journal of Computer Applications, v. 104, n. 11, 2014, p. 30-34.

ISO/ASTM 52900:2015, Additive manufacturing - General principles – Terminology. 2015.

JACOBS, P. F. Rapid prototyping & manufacturing: fundamentals of stereolithography. Society of Manufacturing Engineers, 1992.

JIAO, J.; TSENG, M.M. Customizability analysis in design for mass customization. Computer-Aided Design, v. 36, n. 8, p. 745-757, 2004.

SILVEIRA, Z. C. Jornal da USP: Colher para pessoas com dificuldades motoras será feita no Brasil. 2017.

KAYE, R. et al. Three dimensional printing: A review on the utility within medicine and otolaryngology. International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology. v. 89, p. 145-148, 2016.

KING, T. W. Assitive Technology: Essential Human Factors. Allyn & Bacon, 1999, 305p.

KUPPER D.; HEISING W.; CORMAN G.; Get ready for industrialized additive manufacturing, BCG publications, April 2017.

LAKE, C. Upper-Limb Prosthetics : Using Evidence-Based Practice to Enhance Patient Care Experiences. The Academy TODAY, pp.4–7. 2011.

LAM, A. E. Análise da Resistência Mecânica de Componentes Fabricados pelo Processo de Modelagem Por Fusão e Deposição - FDM. 2008. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2008.

LAMPEL, J.; MINTZBERG, H. Customizing customization. *Sloan management review*, v. 38, n. 1, p. 21-30, 1996.

LANE, D. M. Online Statistics Education: A Multimedia Course of Study. Rice University, 2008.

LEE, C. S. et al. Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of materials processing technology*, v. 187, p. 627-630, 2007.

LI, C. et al. Advances in medical applications of additive manufacturing. *Engineering*, 2020.

LIM, L. T.; AURAS, R.; RUBINO, M. Processing technologies for poly (lactic acid). *Progress in polymer science*, Elsevier, v. 33, n. 8, p. 820–852, 2008.

LIPSON, H.; KURMAN, M. *Fabricated – The New World of 3D Printing*. 1a. ed. Indianapolis: Wiley. 2013.

LJUNGBERG, L. Y. Materials selection and design for development of sustainable products. *Materials & Design*, v. 28, n. 2, p. 466-479, 2007.

LÖBACH, Bernd. *Design industrial*. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

LOKENSGARD, E. *Plásticos industriais: teoria e aplicações*. 5 ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013. 616 p.

LUNSFORD, C. et al. Innovations with 3-dimensional printing in physical medicine and rehabilitation: A review of the literature. *PM&R*, Elsevier, v. 8, n. 12, p. 1201–1212. 2016.

MARTIN, J. L. et al. Medical device development: The challenge for ergonomics. *Applied ergonomics*, v. 39, n. 3, p. 271-283, 2008.

MINITAB. Redução de modelo. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/regression-models/model-reduction/>>. Acesso em: jan. 2019.

- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Applied statistics and probability for engineers. John Wiley & Sons, 2017.
- MOREIRA, R. M. D. Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM. 2016.
- NAMPOOTHIRI, K. M.; NAIR, N. R.; JOHN, R. P. An overview of the recent developments in polylactide (pla) research. *Bioresouce technology*, Elsevier, v. 101, n. 22, p. 8493–8501, 2010.
- NERI, M. C. Diversidade: retratos da deficiência no Brasil. 2003.
- NETO. R. et al. Digital-based engineering tools for tailored design of medical implants. *New Trends in Mechanism and Machine Science*, v. 24, p.733-741, 2015.
- OMACHONU, V. K.; EINSPRUCH, Norman G. Innovation in healthcare delivery systems: a conceptual framework. *The Innovation Journal: The Public Sector Innovation Journal*, v. 15, n. 1, p. 1-20, 2010.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). Relatório Mundial sobre a Deficiência. World Health Organization, The World Bank. São Paulo: SEDPcD, 2012.
- OSTUZZI, F. et al. + TUO project: low cost 3D printers as helpful tool for small communities with rheumatic diseases. *Rapid Prototyping Journal*. v. 21, n. 5, p. 491–505, 2015.
- PAHL, G.; BEITZ, W. Engineering design: a systematic approach. Springer Science & Business Media, 2013.
- PALOUSEK, D. et al. Pilot study of the wrist orthosis design process. *Rapid Prototyping Journal*, v. 20, n. 1, p. 27-32, 2014.
- PATERSON, A. M. J. et al. Comparing Additive Manufacturing Technologies for Customized Wrist Splints. *Rapid Prototyping Journal*, v. 21, n. 3, p. 230–243, 2015.
- PAZMINO, A. V. Uma reflexão sobre design social, eco design e design sustentável. *Simpósio Brasileiro de Design Sustentável*, v. 1, p. 1-4, 2007.

- PEI, E. et al. The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer. *Rapid Prototyping Journal*, 2015.
- PHILLIPS, B.; ZHAO, H. Predictors of assistive technology abandonment. *Assistive technology*, v. 5, n. 1, p. 36-45, 1993.
- PLOS, O. et al. A Universalist strategy for the design of Assistive Technology. *International Journal of Industrial Ergonomics*, v. 42, n. 6, p. 533-541, 2012.
- POUNTNET, T. *Fisioterapia pediátrica*. Elsevier Brasil, 2008.
- QUIRINO, E. M. Análise de desempenho de corpos de prova poliméricos gerados por manufatura aditiva para aplicação em dispositivos assistivos. Relatório de iniciação científica. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2019.
- RADABAUGH, M. P. Study on the Financing of Assistive Technology Devices of Services for Individuals with Disabilities -A report to the president and the congress of the United State, National Council on Disability, 1993.
- RASAL, R. M.; JANORKAR, A. V.; HIRT, D. E. Poly (lactic acid) modifications. *Progress in polymer science*, v. 35, n. 3, p. 338-356, 2010.
- REBELO, F. *Ergonomia no dia a dia: O contributo da ergonomia para a nossa qualidade de vida*. Sílab Itda de Manchester, Lisboa, 2017.
- RENGIER, F. et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. v. 5, n. 4, p. 335-341, 2010.
- RESNIK, L. et al. Advanced upper limb prosthetic devices: implications for upper limb prosthetic rehabilitation. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, Elsevier, v. 93, n. 4, p. 710–717, 2012.
- ROCHA, E. F.; LUIZ, A; ZULIAN, M. A. R. Reflexões sobre as possíveis contribuições da terapia ocupacional nos processos de inclusão escolar. *Rev. Ter. ocup*, v. 14, n. 2, p. 71-78, 2003.

RODRIGUES, P. R.; ALVES, L. R. G. Tecnologia assistiva - uma revisão do tema, 2013.

RODRIGUES, V. P. et al. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. Revista GEPROS, v. 12, n. 3, p. 1, 2017.

ROSA, E.L.S.; OLESKOVICZ, C.F.; ARAGÃO, B.N. Rapid prototyping in maxillofacial surgery and traumatology: case report. Braz. Dent. J., Ribeirão Preto, v.15, n.2, p.243-247, 2004.

ROTO, V.; RANTAVUO, H.; VÄÄNÄNEN-VAINIO-MATTILA, K. Evaluating user experience of early product concepts. In: Proc. DPPI. p. 199-208. 2009.

RÓZ, A. L.; GIESSE, R. O futuro dos plásticos: biodegradáveis e fotodegradáveis. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 13, n. 4, p. E4-E5, 2003.

SALINAS, R. 3D printing with RepRap cookbook. Packt Publishing Ltd, 2014.

SANATGAR et al. Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: Effect of FDM printing process parameters. Applied Surface Science, v. 403, p. 551-563, 2017.

SANTANA, L. et al. Avaliação de uma impressora 3D baseada em projeto de código aberto na fabricação de peças em PLA. 2015.

SANTOS, A. V. F.; SILVEIRA, Z. C. AT-d8sign: methodology to support development of assistive devices focused on user-centered design and 3D technologies. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 42, p. 1-15, 2020.

SANTOS, D.A.N. et al. Obeduc: o uso da tecnologia assistiva. Jorsen., v. 16, n.1, p. 774–777, 2016.

SEGALLA, J. I. da F.; DA SILVA, C. R.; PEDROSO, G. S. O idoso e a deficiência: um novo olhar à questão da inclusão social do idoso. In: Congresso Nacional do Conselho Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Direito, 2008, Brasília. Anais. Brasília, 2008. 1017-1033 pp.

SOUZA, M. A.; CEZARANI, A; MATTIELLO-SVERZUT, A. C. Efeito do uso das órteses no prolongamento da marcha de pacientes com distrofia muscular de Duchenne: revisão da literatura. *Acta Fisiátrica*, v. 22, n. 3, 2015.

STATISTA. Most used 3D printing technologies 2017–2018. Disponível em: statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies. Acesso em jun. 2019.

SILVEIRA, G.; BORENSTEIN, D.; FOGLIATTO, F. S. Mass customization: Literature review and research directions. *International journal of production economics*, v. 72, n. 1, p. 1-13, 2001.

SOOD, A. K.; OHDAR, R. K.; MAHAPATRA, S. S. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research*, v. 3, n. 1, p. 81-90, 2012.

STEPHEN, A. O.; DALGARNO, K. W.; MUNGUAL, J. Quality assurance and process monitoring of fused deposition modelling made parts. *Advanced research in virtual and rapid prototyping*. 2014.

STORY, M. F. Maximizing usability: the principles of universal design. *Assistive technology*, v. 10, n. 1, p. 4-12, 1998.

SZILVŠI-NAGY, M.; MATYASI, G. Y. Analysis of STL files. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 38, n. 7-9, p. 945-960, 2003.

TEDESCHI, A. *AAD_Algorithms-Aided Design. Parametric Strategies Using Grasshopper*. Brienza: Edizioni Le Penseur. 2014.

TELFER, S. et al. Embracing additive manufacture: implications for foot and ankle orthosis design. *BMC Musculoskeletal Disorders*, v. 13, n. 84, p. 1471-1474, 2012.

TENÓRIO, J. R. et al. Prototipagem e cirurgia guiada em implantodontia: revisão de literatura. *RFO UPF*, v. 20, n. 1, p. 110-114, 2015.

THOMPSON, M.K. et al. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations and constraints. CIRP Annals – Manufacturing Technology. v. 65. p.737-760, 2016.

TOTI, F. A. et al. Influência da orientação no posicionamento do modelo 3D prototipado por deposição de material fundido - FDM. CONEM, Engenharia em destaque, VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. São Luiz. 2012.

TURNER, B.; STRONG, R.; A. GOLD, S. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, v. 20, n. 3, p. 192-204, 2014.

ULTIMAKER. Ficha técnica do ABS e ficha técnica do PLA. Disponível em: <<https://ultimaker.com/download/67639/TDS%20ABS%20v3.011-por-PT.pdf>>; <<https://ultimaker.com/download/67603/TDS%20PLA%20v3.011-por-PT.pdf>>. Acesso em jun. 2019.

VAN PETTEN, V. N. et al. Efeito do uso de órtese de punho na função manual. *Cadernos de Terapia Ocupacional da UFSCar*, v. 22, n. 1, 2014.

VENTOLA, C. L. Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. *P&T*, v. 39, n. 10, out. 2014. p. 704-711.

VERAS, R. Envelhecimento populacional contemporâneo: demandas, desafios e inovações. *Rev. Saúde Pública*, São Paulo, v. 43, n. 3, p. 548-554, jun. 2009.

VITALE, M.; COTTELEER, M.; HOLDOWSKY, J. An Overview of Additive Manufacturing. *Defense AT&L*, November-December, 2016.

VOLPATO, N. Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D. Editora Blucher, 2017.

WAHLSTER, W. et al. (Ed.). Towards the internet of services: The THESEUS research program. Springer, 2014.

WECHSUNG, I; NAUMANN, A. B. Evaluation methods for multimodal systems: A comparison of standardized usability questionnaires. In: International Tutorial and

Research Workshop on Perception and Interactive Technologies for Speech-Based Systems. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. p. 276-284.

WEGGE, K. P.; ZIMMERMANN, D. Accessibility, usability, safety, ergonomics: concepts, models, and differences. In: International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. p. 294-301.

WITTBRODT, B.; PEARCE, J. M. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing*, v. 8, p. 110-116, 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. International classification of impairments, disabilities, and handicaps: a manual of classification relating to the consequences of disease, published in accordance with resolution WHA29. 35 of the Twenty-ninth World Health Assembly, May 1976. World Health Organization, 1980.

WHOLERS, T. et al. Wholers report 3D printing and additive manufacturing printing state of the industry, annual worldwide progress report. Wholers Associate. ISSN, p. 978-0, 2017.

XKELET. Imobilizaciones a medida. Disponível em: <<https://www.xkelet.com/>>. Acesso em: 03 nov. 2020.

ZIEFLE, E. J. The Discipline of Human Factors of Contemporary Hfe Discipline 5 Paradigms for Ergonomics Congruence Between Integration of the National, 2005.

ZULIAN, M. A. R; FONSECA, A. I. Panorama da Tecnologia Assistiva no Brasil a partir do Plano Viver sem Limite e das contribuições do CNRTA. In: IV Fórum de Tecnologia Assistiva e Inclusão Social da Pessoa com Deficiência e VII Simpósio Paraense de Paralisia Cerebral, 2013, Belém-PA. Anais do IV Fórum de Tecnologia Assistiva e Inclusão Social da Pessoa com Deficiência e VII Simpósio Paraense de Paralisia Cerebral, 2013.

ANEXOS

Tabela 9 – Parâmetros variáveis na primeira rodada experimental.

Índice	Parâmetros	Nível 1	Nível 2	Nível 3
A	Espessura de camada (mm)	0,125	0,300	-
B	Estratégia de preenchimento	Retilinear	Favo	-
C	Número de paredes	2	3	-
D	Cor	Virgem	Azul	-
E	Direção	X	Y	XY

Fonte: Quirino (2019).

Tabela 10 – Matriz de planejamento da primeira rodada experimental.

Nº	A	B	C	D	E	Nº	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1	25	2	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	26	2	1	1	1	2
3	1	1	1	1	3	27	2	1	1	1	3
4	1	1	1	2	1	28	2	1	1	2	1
5	1	1	1	2	2	29	2	1	1	2	2
6	1	1	1	2	3	30	2	1	1	2	3
7	1	1	2	1	1	31	2	1	2	1	1
8	1	1	2	1	2	32	2	1	2	1	2
9	1	1	2	1	3	33	2	1	2	1	3
10	1	1	2	2	1	34	2	1	2	2	1
11	1	1	2	2	2	35	2	1	2	2	2
12	1	1	2	2	3	36	2	1	2	2	3
13	1	2	1	1	1	37	2	2	1	1	1
14	1	2	1	1	2	38	2	2	1	1	2
15	1	2	1	1	3	39	2	2	1	1	3
16	1	2	1	2	1	40	2	2	1	2	1
17	1	2	1	2	2	41	2	2	1	2	2
18	1	2	1	2	3	42	2	2	1	2	3
19	1	2	2	1	1	43	2	2	2	1	1
20	1	2	2	1	2	44	2	2	2	1	2
21	1	2	2	1	3	45	2	2	2	1	3
22	1	2	2	2	1	46	2	2	2	2	1
23	1	2	2	2	2	47	2	2	2	2	2
24	1	2	2	2	3	48	2	2	2	2	3

Fonte: Quirino (2019).

Tabela 11 – Resultados da primeira rodada experimental.

Nº	A	B	C	D	E	σ_T (MPa)	E_T (GPa)	σ_F (MPa)	E_F (GPa)	e_z (mm)	e_{xy} (mm)	t_n
1	1	1	1	1	1	19,09	1,80	59,35	2,47	0,24	0,20	0,85
2	1	1	1	1	2	17,20	1,72	58,30	2,87	0,18	0,57	0,85
3	1	1	1	1	3	23,61	2,28	43,56	2,83	0,20	0,13	0,85
4	1	1	1	2	1	30,33	2,48	59,08	2,50	0,23	0,64	0,85
5	1	1	1	2	2	47,02	2,87	52,43	1,96	0,23	-0,10	0,85
6	1	1	1	2	3	26,84	2,50	49,70	1,93	0,11	0,38	0,85
7	1	1	2	1	1	27,34	2,02	53,59	2,29	0,37	0,10	1,09
8	1	1	2	1	2	26,54	2,22	49,42	2,09	0,40	-0,15	1,09
9	1	1	2	1	3	22,20	2,21	48,67	3,06	0,35	0,15	1,09
10	1	1	2	2	1	32,68	2,14	51,47	1,95	0,20	0,13	1,09
11	1	1	2	2	2	31,62	2,49	51,85	2,42	0,08	0,15	1,09
12	1	1	2	2	3	32,96	2,34	50,01	2,41	0,08	0,22	1,09
13	1	2	1	1	1	26,79	2,21	48,90	2,11	0,49	0,65	1,16
14	1	2	1	1	2	25,72	2,40	63,67	2,73	0,33	0,05	1,16
15	1	2	1	1	3	23,07	2,18	43,89	1,96	0,47	0,05	1,16
16	1	2	1	2	1	25,36	2,30	60,20	2,55	0,42	0,17	1,16
17	1	2	1	2	2	27,12	2,34	53,67	2,38	0,30	0,51	1,16
18	1	2	1	2	3	20,71	2,17	48,53	2,27	0,36	0,31	1,16
19	1	2	2	1	1	24,08	2,20	53,87	2,34	0,45	0,43	1,17
20	1	2	2	1	2	24,26	2,28	56,36	2,67	0,26	0,45	1,17
21	1	2	2	1	3	22,14	2,34	65,02	3,43	0,07	0,50	1,17
22	1	2	2	2	1	32,40	2,85	56,42	2,62	0,27	0,55	1,17
23	1	2	2	2	2	23,07	2,47	64,95	2,81	0,42	0,23	1,17
24	1	2	2	2	3	29,32	1,75	61,64	2,72	0,28	0,50	1,17
25	2	1	1	1	1	19,99	1,57	49,80	2,00	0,18	0,41	0,64
26	2	1	1	1	2	29,04	2,09	50,78	2,09	0,10	0,50	0,64
27	2	1	1	1	3	29,95	2,11	44,94	1,94	0,22	-0,05	0,64
28	2	1	1	2	1	26,75	1,99	50,45	1,94	0,23	0,57	0,64
29	2	1	1	2	2	31,63	2,32	54,77	2,38	-0,01	0,12	0,64
30	2	1	1	2	3	35,70	2,38	49,15	2,14	0,12	0,30	0,64
31	2	1	2	1	1	26,32	1,71	45,65	1,80	0,30	0,06	0,89
32	2	1	2	1	2	23,10	2,00	55,13	2,27	0,13	0,50	0,89
33	2	1	2	1	3	30,76	2,04	44,07	1,94	0,32	-0,07	0,89
34	2	1	2	2	1	29,46	2,50	56,87	2,53	0,32	0,18	0,89
35	2	1	2	2	2	31,99	2,52	53,87	2,61	0,26	0,59	0,89
36	2	1	2	2	3	30,48	2,31	49,99	2,62	0,32	0,32	0,89
37	2	2	1	1	1	37,02	2,69	62,00	2,79	0,21	0,12	1,10
38	2	2	1	1	2	43,00	2,75	71,10	3,28	0,13	0,40	1,10
39	2	2	1	1	3	40,97	2,82	68,51	2,91	0,14	0,18	1,10
40	2	2	1	2	1	34,90	2,42	60,40	2,67	0,29	0,03	1,10
41	2	2	1	2	2	47,52	3,00	64,16	2,95	0,07	0,02	1,10
42	2	2	1	2	3	35,68	2,63	61,15	2,87	0,19	0,16	1,10
43	2	2	2	1	1	29,28	2,34	56,73	2,46	0,22	0,37	1,09
44	2	2	2	1	2	49,69	3,05	67,36	2,62	-0,03	0,01	1,09
45	2	2	2	1	3	37,30	2,33	59,89	2,81	0,25	0,08	1,09
46	2	2	2	2	1	38,03	2,53	54,22	2,53	0,28	0,53	1,09
47	2	2	2	2	2	49,73	2,89	67,06	2,93	0,06	-0,05	1,09

48	2	2	2	3	37,93	2,45	63,64	2,81	0,17	0,28	1,09
----	---	---	---	---	-------	------	-------	------	------	------	------

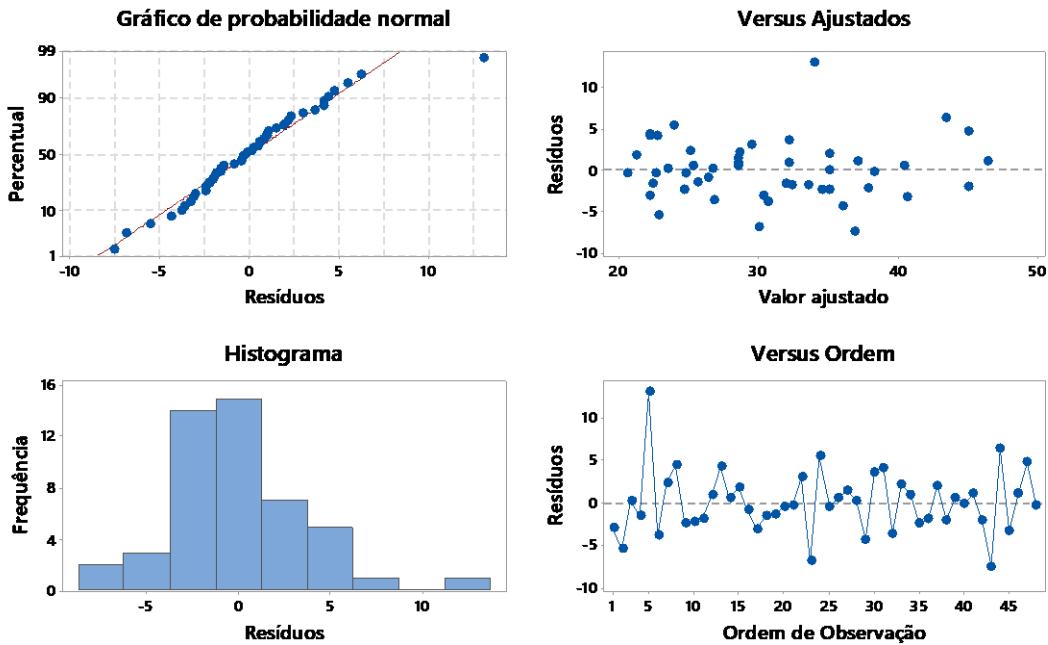
Fonte: Quirino (2019).

Tabela 12 – ANOVA da tensão máxima de tração da primeira rodada experimental.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	20	2337,79	116,889	5,10	0,000
Linear	6	1347,23	224,539	9,80	0,000
Espessura	1	711,08	711,080	31,04	0,000
Estratégia	1	218,86	218,863	9,55	0,005
Paredes	1	6,52	6,521	0,28	0,598
Cor	1	255,70	255,699	11,16	0,002
Direção	2	155,07	77,535	3,38	0,049
Interações de 2 fatores	14	990,56	70,754	3,09	0,006
Espessura*Estratégia	1	597,06	597,065	26,06	0,000
Espessura*Paredes	1	3,98	3,985	0,17	0,680
Espessura*Cor	1	40,38	40,385	1,76	0,195
Espessura*Direção	2	135,49	67,747	2,96	0,069
Estratégia*Paredes	1	0,02	0,024	0,00	0,974
Estratégia*Cor	1	113,68	113,677	4,96	0,034
Estratégia*Direção	2	43,94	21,969	0,96	0,396
Paredes*Cor	1	0,13	0,134	0,01	0,940
Paredes*Direção	2	23,89	11,945	0,52	0,600
Cor*Direção	2	31,97	15,984	0,70	0,506
Erro	27	618,50	22,907		
Total	47	2956,29			

Fonte: Quirino (2019).

Figura 71 – Gráficos de resíduos para tensão máxima de tração na primeira rodada experimental.



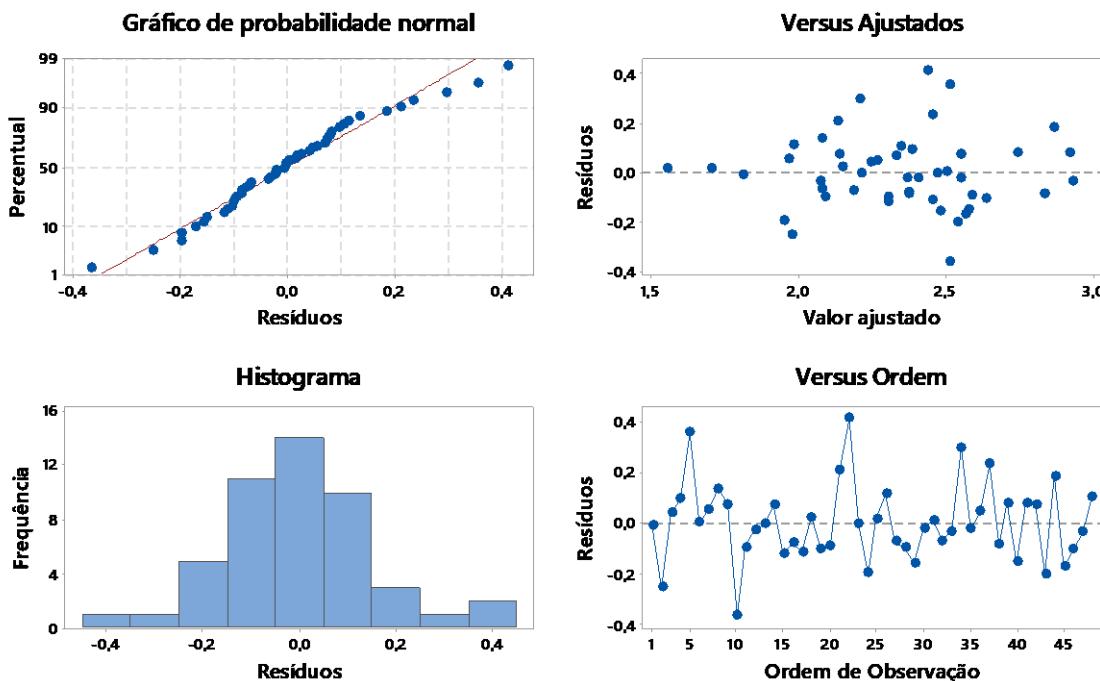
Fonte: Quirino (2019).

Tabela 13 – ANOVA primeira rodada módulo de elasticidade de tração.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	20	4,24540	0,212270	5,37	0,000
Linear	6	2,15120	0,358533	9,08	0,000
Espessura	1	0,18256	0,182561	4,62	0,041
Estratégia	1	0,96415	0,964153	24,41	0,000
Paredes	1	0,00003	0,000026	0,00	0,980
Cor	1	0,56507	0,565067	14,31	0,001
Direção	2	0,43939	0,219695	5,56	0,009
Interações de 2 fatores	14	2,09421	0,149586	3,79	0,001
Espessura*Estratégia	1	0,74872	0,748719	18,96	0,000
Espessura*Paredes	1	0,00020	0,000196	0,00	0,944
Espessura*Cor	1	0,00442	0,004423	0,11	0,740
Espessura*Direção	2	0,14885	0,074423	1,88	0,171
Estratégia*Paredes	1	0,01189	0,011893	0,30	0,588
Estratégia*Cor	1	0,50637	0,506366	12,82	0,001
Estratégia*Direção	2	0,28043	0,140213	3,55	0,043
Paredes*Cor	1	0,00221	0,002211	0,06	0,815
Paredes*Direção	2	0,15366	0,076828	1,95	0,162
Cor*Direção	2	0,23747	0,118735	3,01	0,066
Erro	27	1,06645	0,039498		
Total	47	5,31185			

Fonte: Quirino (2019).

Figura 72 – Gráficos de resíduos de módulo de elasticidade de tração na primeira rodada experimental.



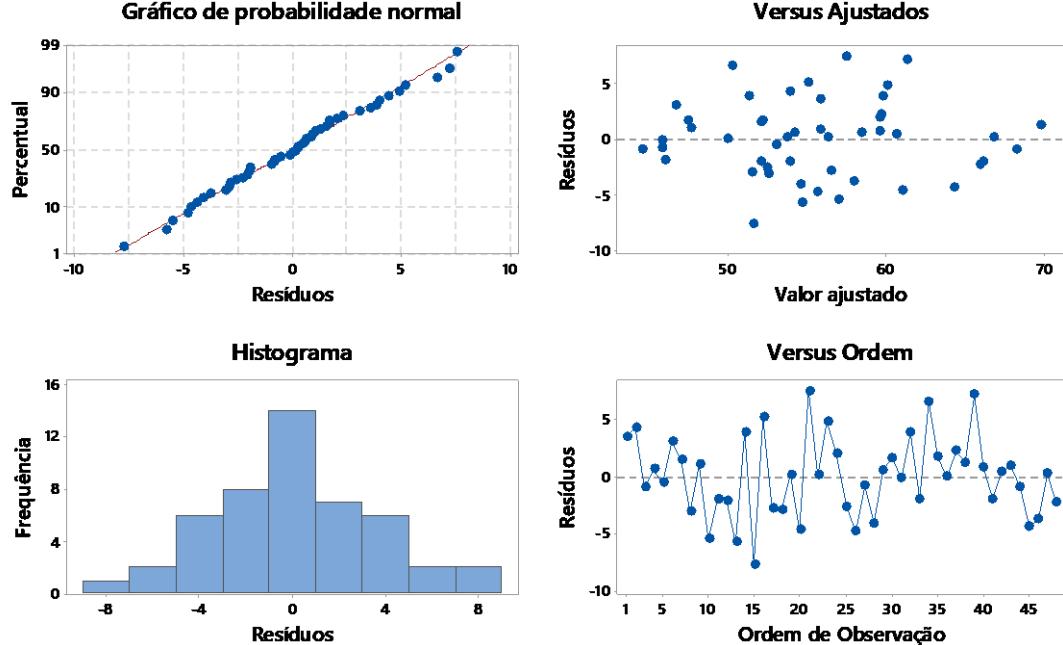
Fonte: Quirino (2019).

Tabela 14 – ANOVA primeira rodada tensão máxima de flexão.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	20	1780,26	89,013	4,19	0,000
Linear	6	1141,85	190,309	8,97	0,000
Espessura	1	68,06	68,062	3,21	0,085
Estratégia	1	837,11	837,109	39,44	0,000
Paredes	1	1,79	1,792	0,08	0,774
Cor	1	13,15	13,153	0,62	0,438
Direção	2	221,74	110,868	5,22	0,012
Interações de 2 fatores	14	638,41	45,601	2,15	0,043
Espessura*Estratégia	1	212,85	212,851	10,03	0,004
Espessura*Paredes	1	25,10	25,103	1,18	0,286
Espessura*Cor	1	0,65	0,649	0,03	0,863
Espessura*Direção	2	62,80	31,398	1,48	0,246
Estratégia*Paredes	1	22,29	22,294	1,05	0,315
Estratégia*Cor	1	15,91	15,910	0,75	0,394
Estratégia*Direção	2	155,96	77,979	3,67	0,039
Paredes*Cor	1	15,55	15,553	0,73	0,400
Paredes*Direção	2	97,35	48,674	2,29	0,120
Cor*Direção	2	29,95	14,975	0,71	0,503
Erro	27	573,05	21,224		
Total	47	2353,32			

Fonte: Quirino (2019).

Figura 73 – Gráficos de resíduos de tensão máxima de flexão na primeira rodada experimental.



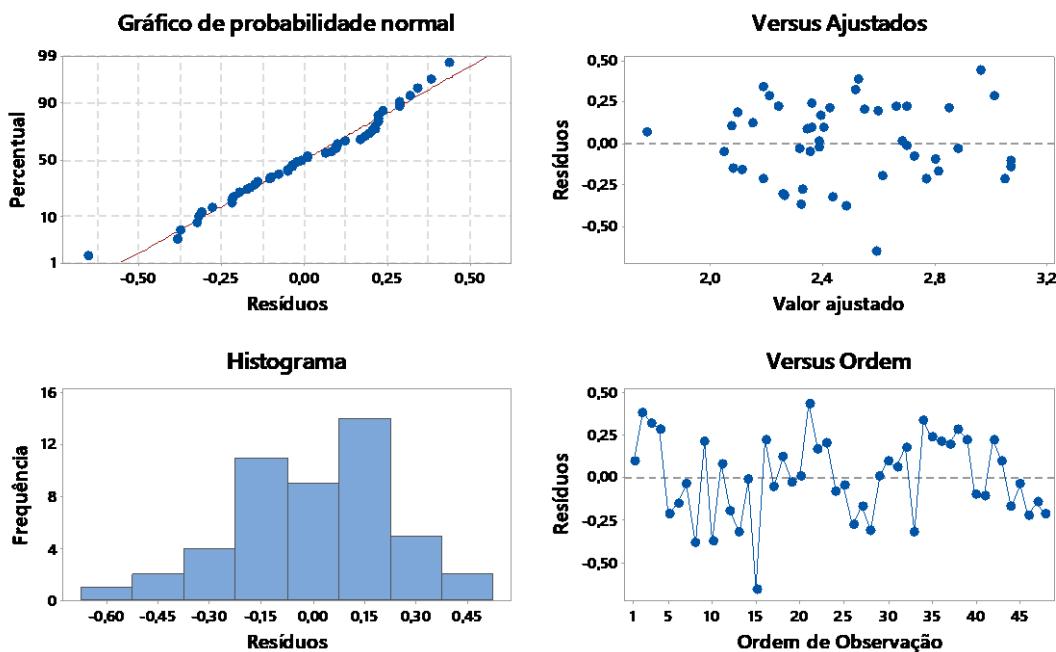
Fonte: Quirino (2019).

Tabela 15 – ANOVA primeira rodada módulo de elasticidade de flexão.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	20	4,39776	0,21989	2,25	0,025
Linear	6	2,20788	0,36798	3,77	0,007
Espessura	1	0,02353	0,02353	0,24	0,628
Estratégia	1	1,61495	1,61495	16,53	0,000
Paredes	1	0,10297	0,10297	1,05	0,314
Cor	1	0,00625	0,00625	0,06	0,802
Direção	2	0,46018	0,23009	2,35	0,114
Interações de 2 fatores	14	2,18988	0,15642	1,60	0,143
Espessura*Estratégia	1	0,79048	0,79048	8,09	0,008
Espessura*Paredes	1	0,10504	0,10504	1,08	0,309
Espessura*Cor	1	0,48252	0,48252	4,94	0,035
Espessura*Direção	2	0,08975	0,04488	0,46	0,637
Estratégia*Paredes	1	0,00367	0,00367	0,04	0,848
Estratégia*Cor	1	0,00000	0,00000	0,00	0,998
Estratégia*Direção	2	0,03796	0,01898	0,19	0,825
Paredes*Cor	1	0,12436	0,12436	1,27	0,269
Paredes*Direção	2	0,43490	0,21745	2,23	0,127
Cor*Direção	2	0,12121	0,06061	0,62	0,545
Erro	27	2,63799	0,09770		
Total	47	7,03575			

Fonte: Quirino (2019).

Figura 74 – Gráfico de resíduos de módulo de elasticidade de flexão na primeira rodada experimental.



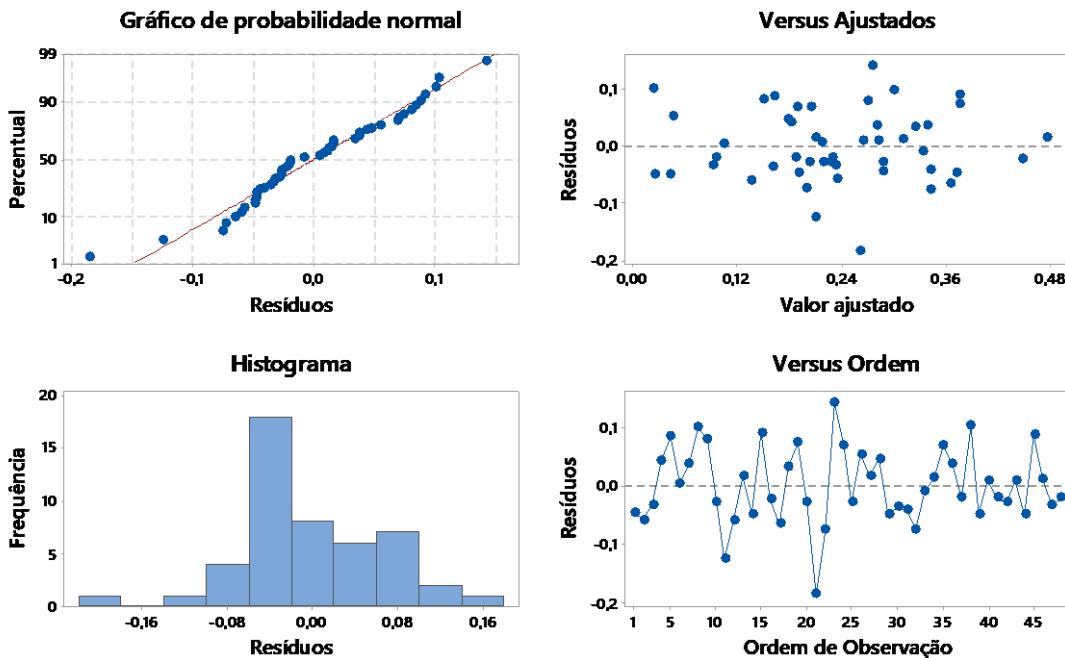
Fonte: Quirino (2019).

Tabela 16 – ANOVA primeira rodada erro em z.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	20	0,709097	0,035455	4,21	0,000
Linear	6	0,379340	0,063223	7,51	0,000
Espessura	1	0,142645	0,142645	16,95	0,000
Estratégia	1	0,039867	0,039867	4,74	0,038
Paredes	1	0,005561	0,005561	0,66	0,423
Cor	1	0,093339	0,093339	11,09	0,003
Direção	2	0,097928	0,048964	5,82	0,008
Interações de 2 fatores	14	0,329757	0,023554	2,80	0,011
Espessura*Estratégia	1	0,050052	0,050052	5,95	0,022
Espessura*Paredes	1	0,029172	0,029172	3,47	0,074
Espessura*Cor	1	0,059034	0,059034	7,01	0,013
Espessura*Direção	2	0,060150	0,030075	3,57	0,042
Estratégia*Paredes	1	0,034311	0,034311	4,08	0,054
Estratégia*Cor	1	0,073895	0,073895	8,78	0,006
Estratégia*Direção	2	0,003831	0,001916	0,23	0,798
Paredes*Cor	1	0,002552	0,002552	0,30	0,586
Paredes*Direção	2	0,012998	0,006499	0,77	0,472
Cor*Direção	2	0,003762	0,001881	0,22	0,801
Erro	27	0,227286	0,008418		
Total	47	0,936383			

Fonte: Quirino (2019).

Figura 75 – Gráfico de resíduos de erros em z na primeira rodada experimental.



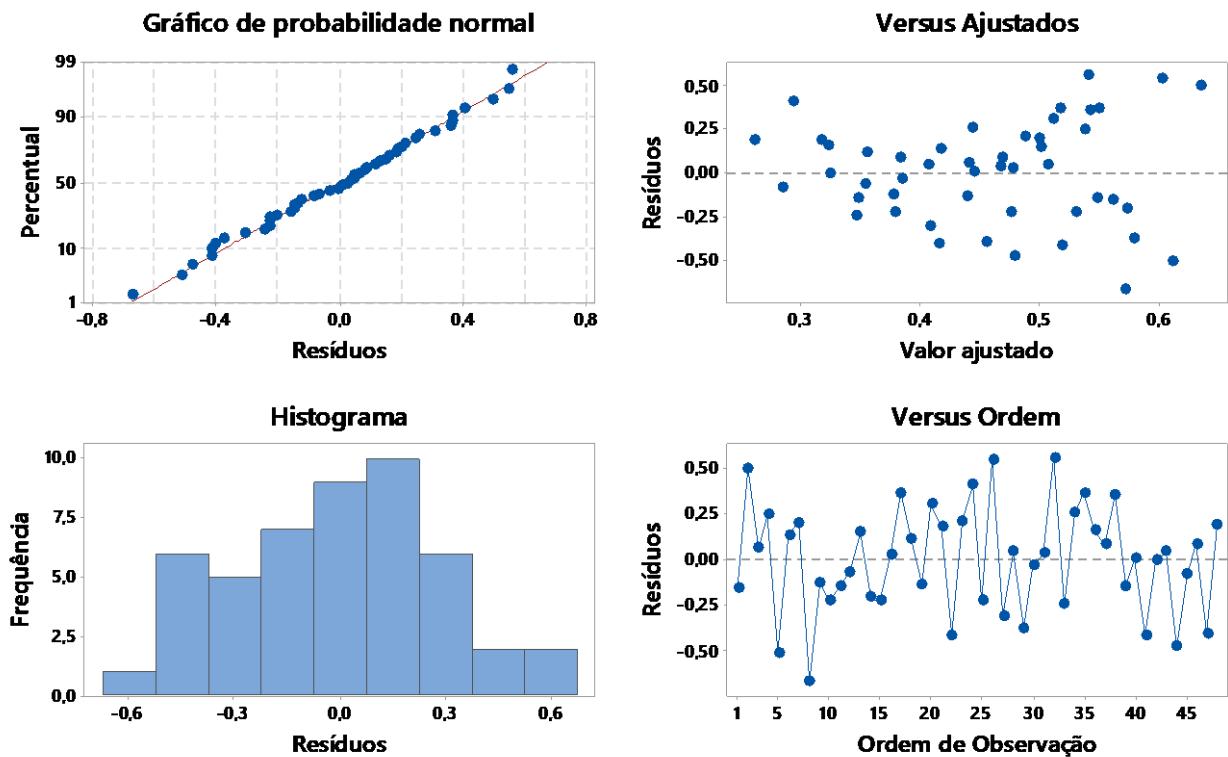
Fonte: Quirino (2019).

Tabela 17 – ANOVA primeira rodada erros em XY.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	6	0,42057	0,070095	0,72	0,633
Linear	6	0,42057	0,070095	0,72	0,633
Espessura	1	0,01225	0,012245	0,13	0,724
Estratégia	1	0,04481	0,044815	0,46	0,500
Paredes	1	0,04688	0,046875	0,48	0,491
Cor	1	0,00669	0,006690	0,07	0,794
Direção	2	0,30994	0,154971	1,60	0,214
Erro	41	3,97017	0,096834		
Total	47	4,39074			

Fonte: Quirino (2019).

Figura 76 – Gráfico de resíduos de erros no plano XY na primeira rodada experimental.



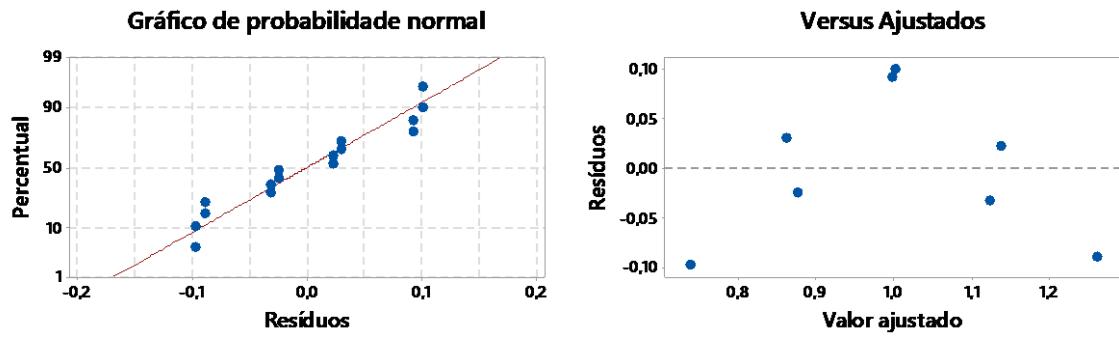
Fonte: Quirino (2019).

Tabela 18 – ANOVA primeira rodada tempo de impressão.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	0,411275	0,102819	14,41	0,000
Linear	4	0,411275	0,102819	14,41	0,000
Espessura	1	0,075625	0,075625	10,60	0,008
Estratégia	1	0,275625	0,275625	38,62	0,000
Paredes	1	0,060025	0,060025	8,41	0,014
Cor	1	0,000000	0,000000	0,00	1,000
Erro	11	0,078500	0,007136		
Total	15	0,489775			

Fonte: Quirino (2019).

Figura 77 – Gráfico de resíduos de tempo de impressão na primeira rodada experimental.



Fonte: Quirino (2019).

Tabela 19 – Parâmetros variáveis na segunda rodada experimental.

Índice	Parâmetros	Nível -	Nível +
A	Espessura de camada (mm)	0,250	0,300
B	Porcentagem de preenchimento	30%	60%

Fonte: Autor

Tabela 20 – Parâmetros fixos na segunda rodada experimental.

Parâmetros fixos	Nível
Diâmetro do bico extrusor	0,4mm
Diâmetro do filamento	1,75mm
Material	PLA
Cor	Azul
Temp. de impressão	230°C
Velocidade de extrusão	100mm/s
Base (camadas inferiores)	0
Topo (camadas superiores)	0
Número de paredes	2
Estratégia de preenchimento	Favo
Direção	X

Fonte: Quirino (2019).

Tabela 21 – Matriz de planejamento da segunda rodada.

Nº	A	B
1	-	-
2	-	+
3	+	-
4	+	+

Fonte: Quirino (2019).

Tabela 22 – Resultados experimentais da segunda rodada.

Nº	A	B	σ_T (MPa)	E_T (GPa)	σ_F (MPa)	E_F (GPa)	e_z (mm)	e_{xy} (mm)	t_n
1	1	1	19,09	1,80	59,35	2,47	0,24	0,20	0,85
2	1	1	17,20	1,72	58,30	2,87	0,18	0,57	0,85
3	1	1	23,61	2,28	43,56	2,83	0,20	0,13	0,85
4	1	1	30,33	2,48	59,08	2,50	0,23	0,64	0,85

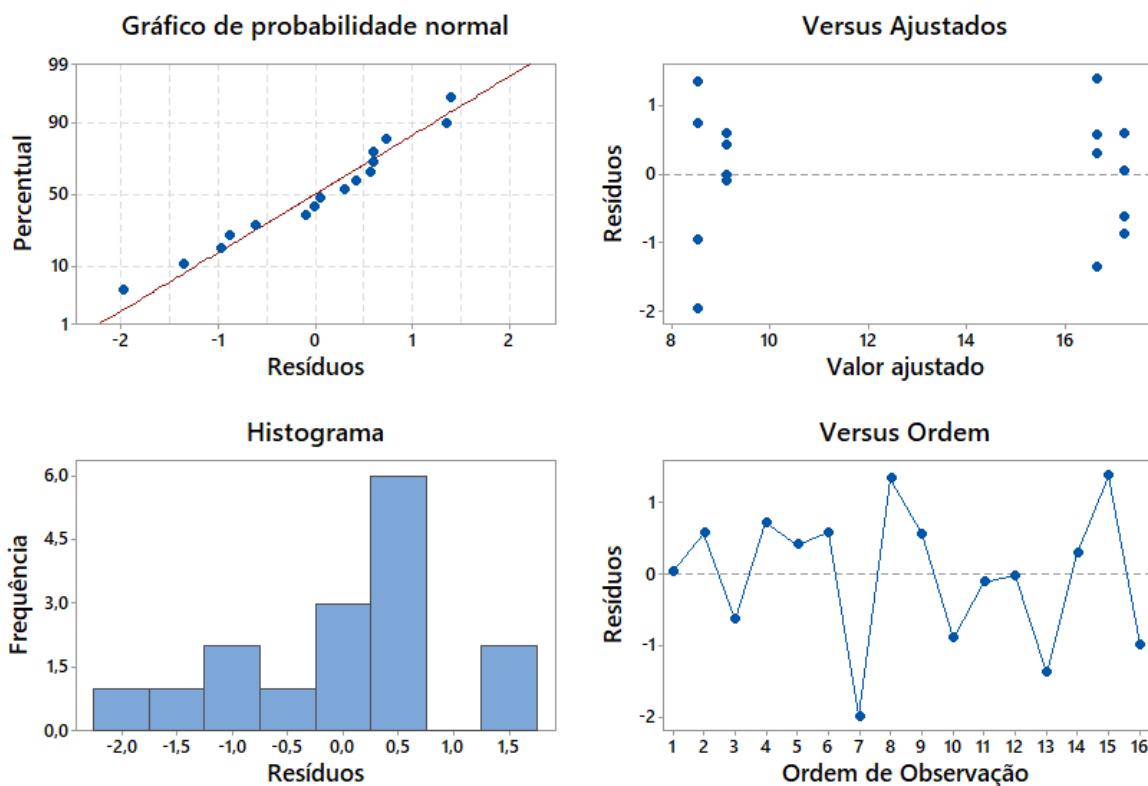
Fonte: Quirino (2019).

Tabela 23 – ANOVA segunda rodada tensão máxima de tração.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	3	263,877	87,959	83,08	0,000
Linear	2	263,091	131,545	124,25	0,000
Espessura de camada	1	1,314	1,314	1,24	0,287
% de preenchimento	1	261,776	261,776	247,26	0,000
Interações de 2 fatores	1	0,787	0,787	0,74	0,406
Espessura de camada*% de preenchimento	1	0,787	0,787	0,74	0,406
Erro	12	12,704	1,059		
Total	15	276,582			

Fonte: Quirino (2019).

Figura 78 – Gráfico de resíduos da tensão máxima de tração na primeira rodada experimental.



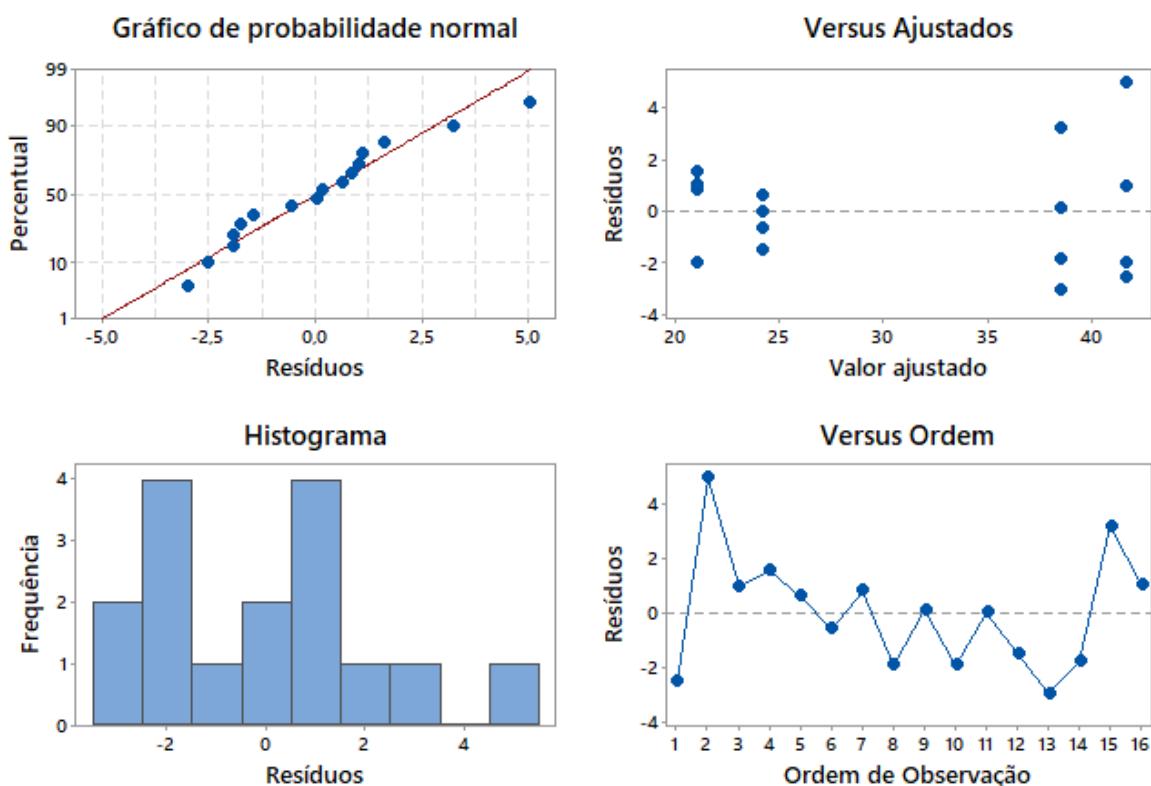
Fonte: Quirino (2019).

Tabela 24 – ANOVA segunda rodada módulo de elasticidade de tração.

Fonte	GL	SQ (Ajustado)	QM (Ajustado)	Valor F	Valor-P
Modelo	3	2,08646	0,69549	93,53	0,000
Linear	2	2,08161	1,04081	139,97	0,000
Espessura de camada	1	0,03474	0,03474	4,67	0,052
% de preenchimento	1	2,04687	2,04687	275,27	0,000
Interações de 2 fatores	1	0,00484	0,00484	0,65	0,435
Espessura de camada*% de preenchimento	1	0,00484	0,00484	0,65	0,435
Erro	12	0,08923	0,00744		
Total	15	2,17569			

Fonte: Quirino (2019).

Figura 79 – Gráfico de resíduos do módulo de elasticidade de tração na primeira rodada experimental.



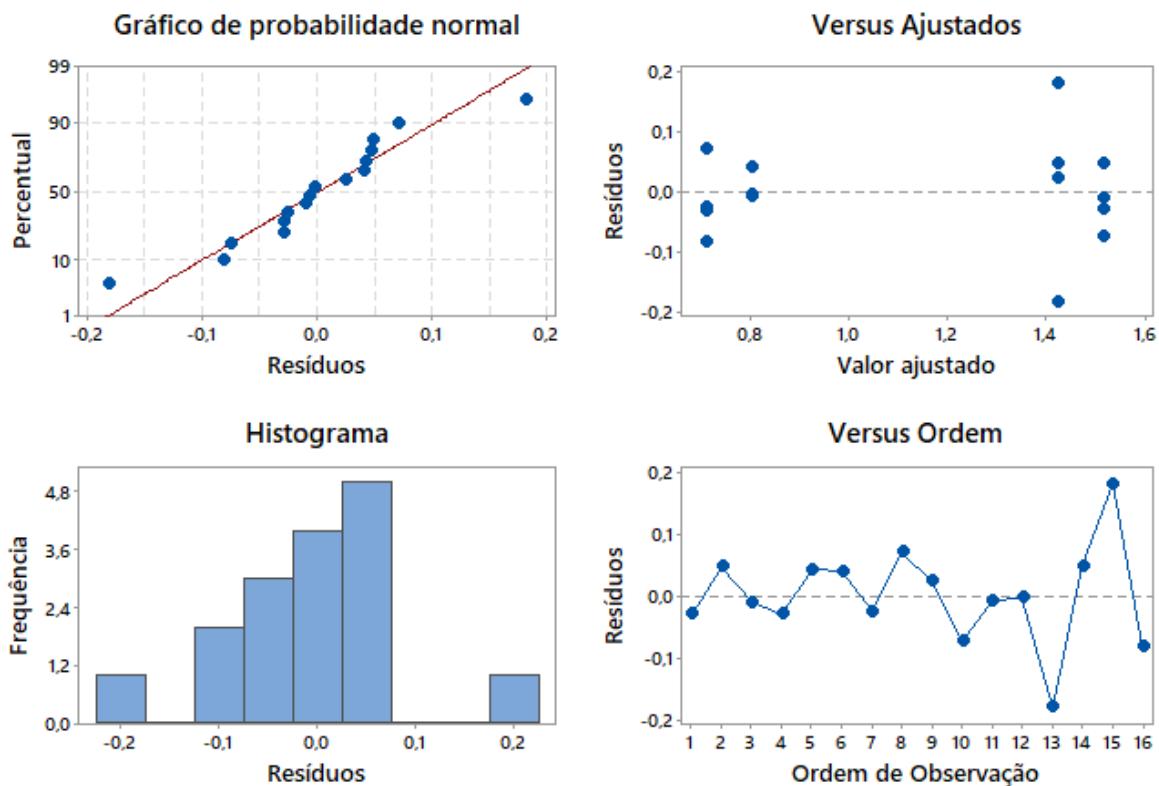
Fonte: Quirino (2019).

Tabela 25 – ANOVA segunda rodada tensão maxima de flexão.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	3	1268,94	422,98	74,88	0,000
Linear	2	1266,74	633,37	112,12	0,000
Espessura de camada	1	38,94	38,94	6,89	0,022
% de preenchimento	1	1227,80	1227,80	217,35	0,000
Interações de 2 fatores	1	2,21	2,21	0,39	0,544
Espessura de camada*% de preenchimento	1	2,21	2,21	0,39	0,544
Erro	12	67,79	5,65		
Total	15	1336,73			

Fonte: Quirino (2019).

Figura 80 – Gráfico de resíduos da tensão máxima de flexão na primeira rodada experimental.



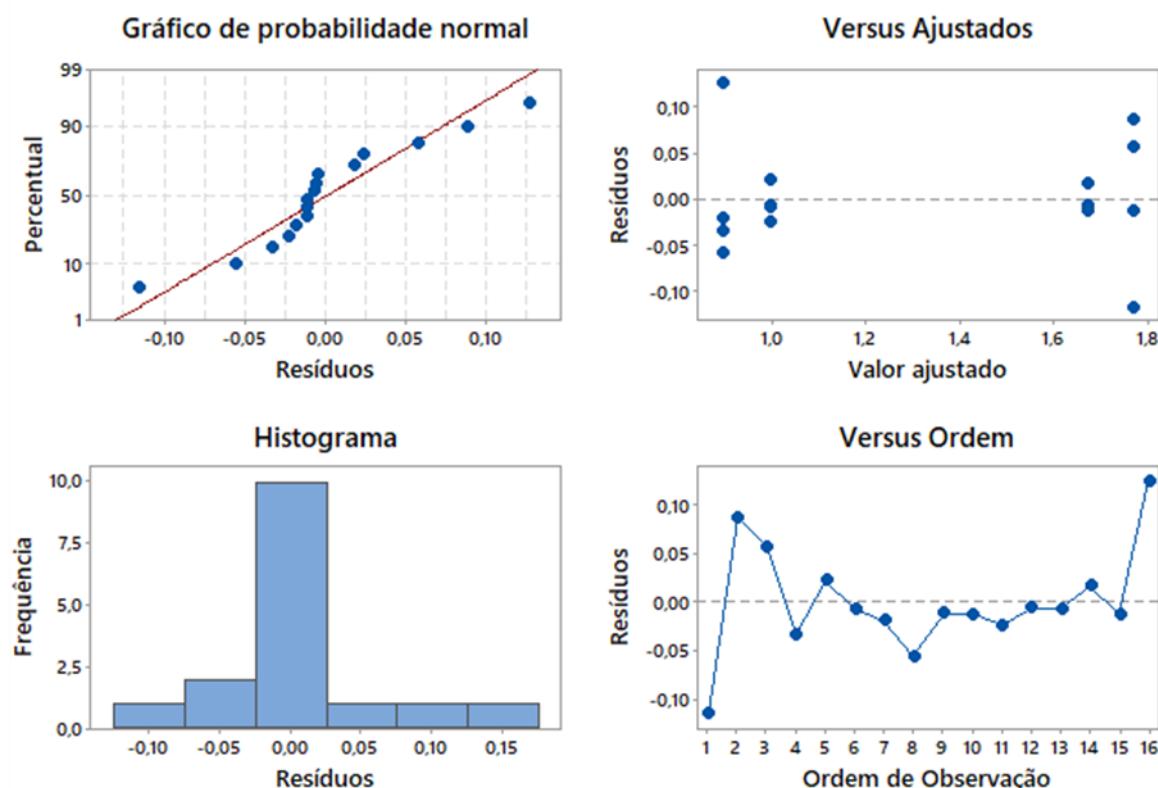
Fonte: Quirino (2019).

Tabela 26– ANOVA segunda rodada módulo de elasticidade de flexão.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	3	2,46202	0,82067	210,21	0,000
Linear	2	2,46177	1,23089	315,28	0,000
Espessura de camada	1	0,03874	0,03874	9,92	0,008
% de preenchimento	1	2,42303	2,42303	620,64	0,000
Interações de 2 fatores	1	0,00024	0,00024	0,06	0,807
Espessura de camada*% de preenchimento	1	0,00024	0,00024	0,06	0,807
Erro	12	0,04685	0,00390		
Total	15	2,50887			

Fonte: Quirino (2019).

Figura 81 – Gráfico de resíduos do módulo de elasticidade de flexão na primeira rodada experimental.



Fonte: Quirino (2019).